

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra informatiky

Výkonostní testování integrity heterostrukturální telekomunikační sítě

Integrity Performance Testing of Heterostructure Telecommunication Network

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Martin Krupík

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Výkonostní testování integrity heterostrukturní telekomunikační sítě
Integrity Performance Testing of Heterostructure Telecommunication
Network

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Tato diplomová práce je zaměřena na testování integrity heterostrukturní telekomunikační sítě, přičemž vybudovanou telekomunikační infrastrukturu bude tvořit metalické a optické vedení. Cílem práce bude vytvořit návrh topologie sítě, do které budou implementovány Triple play služby. Heterostrukturní síť bude tvořit kombinace dostupných technologií, konkrétně se jedná o optické sítě typu EPON2 resp. xWDM a metalickou síť xDSL. Na vybudované trase bude student provádět měření typických optických parametrů, jako je útlum, výkonová úroveň a disperze. Z pohledu měření na metalické části pak budou probíhat měření parametrů odporu, kapacity aj. Během měření kvalitativních parametrů pro Triple Play služby budou využívány různé délky vybudovaných optických a metalických přenosových tras. Pro změnu délky optické trasy budou využívány dostupné optické kabely, zatímco do metalické sítě budou implementovány simulátory vedení umožňující ovlivnění tras díky možnosti přídavného šumu. Do vybudované heterostrukturní sítě budou připojeny servery, jenž slouží pro generování video, audia a datových toků, které budou následně podrobeny testování za účelem zjištění kvalitativních parametrů tak, aby práce obsahovala zákaznický orientované služby ve formě Triple play. Měření generovaných Triple play služeb budou provedeny pomocí měřicího přístroje AXS 200/625. Student následně provede analýzu heterostrukturní sítě podle normy ITU-T Y. 1564 a doporučení RFC 2544 a RFC 6349.

1. Popis přístupových xPON, xWDM a heterostrukturních sítí.
2. Popis technologie xDSL.
3. Vytvoření experimentálního pracoviště pro heterostrukturní telekomunikační síť tvořenou technologiemi xPON/xDSL/xWDM včetně testování služeb Triple Play.
4. Vyhodnocení výsledků získaných z měření multimediálních služeb Triple Play pro heterostrukturní telekomunikační síť.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] KAZOVSKY, Leonid G., et al.; Broadband Optical Access Networks. Canada: Wiley, 2011. 283 p. ISBN 978-0-470-18235-2.

[2] MA, Maode. Current Research Progress of Optical Networks. 1st Edition. [s.l.]: Springer, 2009. 282 p. ISBN 978-1402098888

[3] LAM, Cedric. Passive Optical Networks: Principles and practice. Oxford: Elsevier Onc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0

[4] DHAINI, Ahmad R. Next-Generation Passive Optical Networks. Saarbrücken: VDM Verlag, 2008. 132 p. ISBN 978-3836435062

[5] GORALSKI, Walter. ADSL and DSL technologies. New York: McGraw-Hill, c1998, xxxii, 379 p. ISBN 00-702-4679-3.

[6] HENS, Francisco J a Jose Manuel CABALLERO. Triple play: building the converged network for IP, VoIP and IPTV. Hoboken, NJ: Wiley, c2008, 401 s. ISBN 978-0-470-75367-5.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2019



prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry

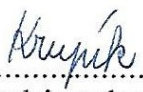


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 28. června 2019


.....
podpis studenta

Rád bych poděkoval Ing. Janu Látalovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Zdeňku Wilčekovi za jeho výpomoc při řešení dílčích problémů v praktické části. Na závěr bych chtěl poděkovat také kolegům Ing. Tomáši Putnovi, Bc. Miroslavu Večeřovi a Bc. Ondřeji Čechovi za pomoc při budování optické trasy.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je vybudovat heterostrukturální síť skládající se z optické a metalické části. Optická část je zde zastoupena systémem EPON a xWDM. Další část, respektive metalická část je zde tvořena systémem ADSL2+ a VDSL2. Po uvedení těchto částí do jednotného celku je na síti v kombinaci s vloženou trasou a šumem prováděna řada testů pro následné nasazení Triple play služeb. Teoretická část se zde nejdříve zabývá optickými přístupovými sítěmi. Zejména pasivními optickými sítěmi PON a to jak starší generací, tak i novou generací. Dále je zde probrána problematika hybridních sítí. Další část je věnována technologiím xDSL a jejím nejznámějším variantám. Teoretická část je zakončena popisem Triple play služeb. Následující praktická část se věnuje vybudování heterostrukturální sítě, na které následně byla provedena analýza pomocí testů RFC 2544, RFC 6349 a ITU-T Y.1564. Praktická část také obsahuje výsledky měření, které byly vykonány na jednotlivých částech sítě. Například pro optickou část byla měřena chromatická disperze, polarizační vidová disperze, útlum, výkonová úroveň a pro metalickou část byly měřeny přenosové rychlosti ADSL2+, VDSL2. Na závěr byly na vytvořenou heterostrukturální síť nasazeny služby typu Triple play (IPTV, VoIP, data) a zkoumal se jejich vliv kvality na vloženou trasu společně s přidáním šumem.

Klíčová slova: EPON, WDM, xDSL, ADSL, VDSL, Triple play, hybridní síť, RFC2544, RFC6349, ITU-T Y.1564, Ethersam, VoIP, IPTV

Abstract

The aim of this thesis is to build a heterostructural network consisting of optical and metal parts. The optical part is represented by EPON and xWDM. The metallic part consists of the ADSL2 + and VDSL2 systems. After connecting these parts into an unified unit the series of tests were performed on the network in combination with inserted line and noise for subsequent deployment of Triple Play services. The theoretical part deals with optical access networks. Especially passive optical networks PON with older and new generation. Furthermore, the issue of hybrid networks is discussed. The next part is dedicated to xDSL technologies and the best known variants. The theoretical part is completed with a description of Triple play services. Practical part deals with building of heterostructural network, which is analyzed using RFC 2544, RFC 6349 and ITU-T Y.1564 tests. Furthermore, practical part contains measurement results, which were performed on individual parts of the network. For example chromatic dispersion, polarization mode dispersion, attenuation, power level for optical part and transfer rates of ADSL2 +, VDSL2 for metalic part were measured. At the end there were services like Triple Play (IPTV, VoIP, Data) deployed on heterostrucure network and the influence of quality of communication was examined depending on line length with added noise.

Keywords: EPON, WDM, xDSL, ADSL, VDSL, Triple play, hybrid network, RFC2544, RFC6349, ITU-T Y.1564, Ethersam, VoIP, IPTV

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	10
Seznam obrázků	13
Seznam tabulek	21
1 Úvod	25
2 Optická přístupová síť	27
2.1 Základní funkční celky OAN	27
2.2 FTTx	28
2.3 Přenos a rozdělení OAN	28
2.4 Přístupová síť WDM-PON	29
2.5 Hybridní síť xPON/xDSL	35
2.6 Hybridní opticko-koaxiální síť HFC	36
3 TDM Passive Optical Network	38
3.1 APON, BPON	38
3.2 GPON/XG-PON	39
3.3 EPON	41
3.4 10GEPON	45
3.5 Topologie PON sítí	46
4 Sítě nové generace - NGN/NGA	47
4.1 Next Generation Network - NGN	47
4.2 Koncepční model NGN	47
4.3 Architektura NGN	48
4.4 NGA-New Generation Acces	49
4.5 Next Generation PON	51
4.6 Technologie Next-Generation PON	55
5 Přístupové technologie xDSL	62
5.1 IDSL	62
5.2 HDSL	63
5.3 SHDSL	63
5.4 ADSL	64
5.5 ADSL2/ADSL2+	67
5.6 VDSL	67
5.7 VDSL2	70

6 Triple play služby	73
6.1 Kvalita služby QoS	73
6.2 IPTV	75
6.3 VoIP	81
6.4 Datová služba	92
7 Vybudování heterostrukturální sítě	94
7.1 Využití síťové komponenty topologie	94
7.2 Využití měřicí přístroje	102
7.3 Využití programy	104
8 Výsledky měření na optické části	105
8.1 Měření útlumu optických tras	105
8.2 Měření chromatické disperze (CD) na optických trasách	106
8.3 Měření polarizační vidové disperze (PMD) na optických trasách	107
8.4 Měření vložných ztrát splitteru	108
8.5 Výkonové úrovně EPON	109
8.6 Spektrální analýza systému WDM	111
9 Výsledky měření na metalické části	113
9.1 ADSL2+ přenosové rychlosti	113
9.2 VDSL2 přenosové rychlosti	116
10 Testování integrity sítě	129
10.1 RFC 2544	129
10.2 ITU-T Y.1564 EtherSAM	162
10.3 RFC 6349	196
11 Měření kvality Triple play služeb	201
11.1 IPTV	201
11.2 VoIP	212
11.3 Data	224
12 Závěr	233
Literatura	235
Přílohy	240
A Obsah DVD	241

B	Nastavení služeb a aplikací	242
B.1	Vstupní parametry pro test ITU-T Y.156 - Ethersam	243
B.2	Nastavení multicastového vysílání ve VLC	245
B.3	Nastavení v programu IxChariot	247
B.4	Web server pro datovou službu	248

Seznam použitých zkratk a symbolů

ACELP	– Algebraic Code-Excited Linear Prediction
ADSL	– Asymmetric Digital Subscriber Line
AON	– Active Optical Network
APON	– ATM PON
ATM	– Asynchronous Transfer Mode
BPON	– Broadband Passive Optical Network
BER	– Bit Error Rate
CELP	– Code-Excited Linear Prediction
CIR	– Committed Information Rate
CQ	– Conversational Quality
CRC	– Cyclic Redundancy Check
CSMA	– Carrier sense Multiple Access
CWDM	– Coarse Wavelength Division Multiplexing
DHCP	– Dynamic Host Configuration Protocol
DMT	– Discrete MultiTone
DOCSIS	– Data Over Cable Service Interface Specification
DSN	– Domain Name System
DSL	– Digital Subscriber Line
DSLAM	– Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DVB	– Digital Video Broadcasting
DVB-S	– Digital Video Broadcasting-Satellite
DVB-T	– Digital Video Broadcasting-Terrestrial
DVD	– Digital Versatile Disc
DWDM	– Dense Wavelength Division Multiplexing
EIR	– Excess Information Rate
EPG	– Elektronik Programming Guide
EPON	– Ethernet Passive Optical Network
Ethersam	– Ethernet Service Activation Methodology
FCS	– Frame Check Sequence
FSAN	– Full Service Access Network
FTP	– File Transfer Protocol
FTTB	– Fiber To The Building
FTTC	– Fiber To The Curb
FTTH	– Fiber To The Home
FTTN	– Fiber To The Node
FTTx	– Fiber To The x

GEM	– GPON Encapsulation Method
GPON	– Gigabite Ethernet Passive Optical Network
GPON	– Gigabit Passive Optical Network
HDSL	– High-Bit-Rate Digital Subscriber Line
HDTV	– High Definition TeleVision
HFC	– Hybrid Fiber-Coaxial
HTTP	– Hypertext Transfer Protocol
ISDL	– ISDN Digital Subscriber Line
IEEE	– Electrical and Electronics Engineers
IGMP	– Internet Group Membership Protocol
IP	– Internet Protocol
IPTV	– Internet Protocol Television
ISDN	– Integrated Services Digital Network
ISDL	– ISDN Digital Subscriber Line
ITU	– International Telecommunication Union
ITU-T	– ITU- Telecommunication Standardization Sector
LAN	– Local Area Network
LLID	– Logical Link Identification
LQ	– Listening Quality
MAC	– Media Access Control
MOS	– Mean Opinion Score
MPCP	– Multi-Point Control Protocol
MPEG	– Moving Picture Experts Group
MPLS	– Multiprotocol Label Switching
MTU	– Maximum Transmission Unit
NGN	– Next Generation Network
NGA	– Next Generation Access
OAM	– Operations, Administration and Management
ODN	– Optical Distribution Network
OLT	– Optical Line Termination
ONT	– Optical Network Termination
ONU	– Optical Network Unit
OTDR	– Optical Time Domain Reflectometry
P2MP	– Point to Multi Point
P2P	– Point to Point
PAM	– Pulse Amplitude Modulation
PAM	– Perceptual Analysis Measurement System
PESQ	– Perceptual Evaluation of Speech Quality
PCM	– Pulse-Code Modulation

PESQ	– Personal Evaluation of Speech Quality
PLOAM	– Physical Layer Operations, Administration and Maintenance
PPV	– Pay Per View
PON	– Passive Optical Network
POTS	– Plain Old Telephony Service
PSNR	– Peak Signal to Noise Ratio
PSTN	– Public Switched Telephone Network
PVR	– Personal Video Recording
QoE	– Quality of Experience
QoS	– Quality of Service
RFC	– Request For Comments
RTCP	– Real-Time Control Protocol
RTP	– Real-Time Transport Protocol
RTSP	– Real Time Streaming Protocol
RTT	– Round-Trip Time
RSVP	– Resource ReSerVation Protocol
SDSL	– Symmetric digital subscriber line
SFP	– Small Form Pluggable
SIP	– Session Initiation Protocol
SLA	– Service Level Agreement
SMPTE	– Society of Motion Picture and Television Engineers
TCP	– Transmission Control Protocol
TDM	– Time Division Multiplexing
TDM-PON	– Time Division Multiplex Passive Optical Network
UDP	– User Datagram Protocol
VDSL	– Very-High-Bit-Rate Digital Subscriber Line
VLAN	– Virtual Local Area Network
VLC	– Variable Length Coding
VoD	– Video on Demand
VoIP	– Voice over IP
VPLS	– Virtual Private LAN Service
WAN	– Wide Area Network
WDM	– Wave Division Multiplexing
WiFi	– Wireless Fidelity

Seznam obrázků

1	Rozdělení optických sítí.[3]	30
2	Princip vlnového multiplexu.	31
3	Kanály CWDM definované ve specifikaci ITU-T G.694.2.[29]	31
4	WDM-PON s pevným přiřazováním vlnových délek.[29]	34
5	WDM-PON s využitím AWG odbočnice.[29]	35
6	Kaskádní zapojení AWG odbočnice a pasivního splitteru.[29]	35
7	Hybridní přístupová xPON/xDSL síť.[67]	36
8	DOCSIS architektura společně s HFC sítí.[67]	37
9	Ukázka formátu přenosových rámců GPON a EPON.[8]	40
10	Přenos v sestupném směru.[7]	41
11	Schéma multirámce v sestupném směru.[7]	42
12	Přenos ve vzestupném směru.[7]	42
13	Schéma multirámce ve vzestupném směru.[7]	43
14	Schéma výměny zpráv v jednom cyklu.[7]	43
15	EPON rámec.[7]	45
16	Topologie PON sítí.[5]	46
17	Konvergence sítí do NGN.[5]	48
18	Vrstvy koncepčního modelu NGN.[2]	48
19	Jednoduchý koncept architektury NGN sítě.[1]	50
20	Evoluce pasivních optických sítí.[26]	52
21	GPON a XG-PON1 koexistence pomocí WDM stacking.[22]	53
22	Flexibilní možnosti nasazení systému NG-PON2.[25]	54
23	Plán vlnových délek pro PON standardy ITU-T a IEEE.[27]	56
24	WDM-TDM PON.[29]	57
25	ODSM PON.[22]	57
26	Stacked XG-PON.[22]	59
27	OFDM spektrum.	59
28	Architektura OFDM-PON sítě. [36]	60
29	CDMA-PON. [37]	61
30	Ukončení ADSL linky na straně účastníka.[3]	65
31	Architektura ADSL.[3]	65
32	Obsazení spektra pro jednotlivé ADSL varianty.[3]	66
33	Asymetrický kmitočtový plán ("998").[3]	69
34	Symetrický kmitočtový plán ("997").[3]	69
35	Zjednodušené schéma s dvěma pásmy.[3]	70
36	Kmitočtové plány pro symetrický režim.[20]	72
37	Kmitočtové plány pro asymetrický režim.[20]	72

38	IPTV komunikační model.[39]	79
39	H.323 a SIP protokoly).[60]	84
40	Komponenty H.323.[57]	85
41	Časový diagram SIP zpráv.[59]	89
42	Vztah mezi jednotlivými druhy MOS hodnocení.[59]	91
43	Vzájemný vztah mezi R faktorem a stupnicí MOS.[59]	92
44	Schéma propojení učeben.	95
45	ONU jednotka Allied Telesis AT-ON1000).[13]	96
46	EXFO FTB-500.[15]	102
47	EXFO AXS-200/850.[58]	103
48	Schéma zapojení při měření pomocí OTDR.	105
49	Reflektogram pro optickou trasu 15 km.	106
50	Schéma zapojení při měření CD.	106
51	Výsledek měření CD.	107
52	Schéma zapojení při měření PMD.	108
53	Metoda 1C.	108
54	Topologie pro měření útlumu splitteru.	109
55	Schéma zapojení při měření výkonové úrovně EPON.	109
56	Topologie pro měření optického spektra.	111
57	Spektrum při optické trase 24,583 km (1491,789 nm - downstream)	111
58	Spektrum při optické trase 24,583 (1470,730 nm - upstream)	112
59	ADSL2+ DOWNSTREAM.	114
60	ADSL2+ UPSTREAM.	115
61	VDSL2 DOWNSTREAM - PORT 12.	118
62	VDSL2 UPSTREAM - PORT12.	118
63	VDSL2 DOWNSTREAM - PORT 10.	119
64	VDSL2 UPSTREAM - PORT10.	120
65	VDSL2 DOWNSTREAM - PORT9.	121
66	VDSL2 UPSTREAM - PORT9.	122
67	VDSL2 DOWNSTREAM - PORT 8.	123
68	VDSL2 UPSTREAM - PORT8.	124
69	VDSL2 DOWNSTREAM - PORT 7.	125
70	VDSL2 UPSTREAM - PORT 7.	126
71	Main Menu VDSL2 modemu	127
72	System Maintenance VDSL2 modemu	128
73	Výpis z terminálu modemu VDSL2 při zadání příkazu VDSL STATUS.	128
74	Schéma zapojení při ověření integrity.	129
75	Nastavení testu RFC 2544.	131

76	RFC 2544 ADSL2+ - PROPUSTNOST (64 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	132
77	RFC 2544 ADSL2+ - PROPUSTNOST (64 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	132
78	RFC 2544 ADSL2+ - PROPUSTNOST (512 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	133
79	RFC 2544 ADSL2+ - PROPUSTNOST (512 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	133
80	RFC 2544 ADSL2+ - PROPUSTNOST (1518 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	134
81	RFC 2544 ADSL2+ - PROPUSTNOST (1518 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	134
82	RFC 2544 ADSL2+ - ZATÍŽITELNOST (64 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	135
83	RFC 2544 ADSL2+ - ZATÍŽITELNOST (64 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	136
84	RFC 2544 ADSL2+ - ZATÍŽITELNOST (512 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	136
85	RFC 2544 ADSL2+ - ZATÍŽITELNOST (512 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	137
86	RFC 2544 ADSL2+ - ZATÍŽITELNOST (1518 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	137
87	RFC 2544 ADSL2+ - ZATÍŽITELNOST (1518 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	138
88	RFC 2544 ADSL2+ - ZTRÁTOVOST (64 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	139
89	RFC 2544 ADSL2+ - ZTRÁTOVOST (64 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	140
90	RFC 2544 ADSL2+ - ZTRÁTOVOST (512 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	140
91	RFC 2544 ADSL2+ - ZTRÁTOVOST (512 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	141
92	RFC 2544 ADSL2+ - ZTRÁTOVOST (1518 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	141
93	RFC 2544 ADSL2+ - ZTRÁTOVOST (1518 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	142
94	RFC 2544 ADSL2+ - ZPOŽDĚNÍ (64 B) - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	143

95	RFC 2544 ADSL2+ - ZPOŽDĚNÍ (512 B) - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	144
96	RFC 2544 ADSL2+ - ZPOŽDĚNÍ (512 B) - Výřez do 500 ms- bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	144
97	RFC 2544 ADSL2+ - ZPOŽDĚNÍ (1518 B) - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	145
98	RFC 2544 ADSL2+ - ZPOŽDĚNÍ (1518 B) - Výřez do 1000 ms - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	145
99	RFC 2544 VDSL2 - PROPUSTNOST (64 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	147
100	RFC 2544 VDSL2 - PROPUSTNOST (64 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	147
101	RFC 2544 VDSL2 - PROPUSTNOST (512 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	148
102	RFC 2544 VDSL2 - PROPUSTNOST (512 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	148
103	RFC 2544 VDSL2 - PROPUSTNOST (1518 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	149
104	RFC 2544 VDSL2 - PROPUSTNOST (1518 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	149
105	RFC 2544 VDSL2 - ZATÍŽITELNOST (64 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	150
106	RFC 2544 VDSL2 - ZATÍŽITELNOST (64 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	151
107	RFC 2544 VDSL2 - ZATÍŽITELNOST (512 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	151
108	RFC 2544 VDSL2 - ZATÍŽITELNOST (512 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	152
109	RFC 2544 VDSL2 - ZATÍŽITELNOST (1518 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	152
110	RFC 2544 VDSL2 - ZATÍŽITELNOST (1518 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	153
111	RFC 2544 VDSL2 - ZTRÁTOVOST (64 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	154
112	RFC 2544 VDSL2 - ZTRÁTOVOST (64 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	155
113	RFC 2544 VDSL2 - ZTRÁTOVOST (512 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	155

114	RFC 2544 VDSL2 - ZTRÁTOVOST (512 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	156
115	RFC 2544 ADSL2+ - ZTRÁTOVOST (1518 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	156
116	RFC 2544 VDSL2 - ZTRÁTOVOST (1518 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	157
117	RFC 2544 ADSL2+ - ZPOŽDĚNÍ (64 B) - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	158
118	RFC 2544 ADSL2+ - ZPOŽDĚNÍ (64 B) - Výřez 200 ms - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	159
119	RFC 2544 VDSL2 - ZPOŽDĚNÍ (512 B) - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	159
120	RFC 2544 VDSL2 - ZPOŽDĚNÍ (512 B) - Výřez do 200 ms- bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	160
121	RFC 2544 VDSL2 - ZPOŽDĚNÍ (1518 B) - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	160
122	RFC 2544 VDSL2 - ZPOŽDĚNÍ (1518 B) - Výřez do 200 ms - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	161
123	Test do CIR.[18]	164
124	Test od CIR do EIR.[18]	164
125	Test při překročení EIR.[18]	165
126	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - VoIP - DOWN- STREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	167
127	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - VoIP - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	168
128	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - DATA - DOWN- STREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	168
129	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - DATA - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	169
130	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - VoIP - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	170
131	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - VoIP - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	170
132	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - DATA - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	171
133	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - DATA - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	171
134	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ JITTER - VoIP - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	172

135	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ JITTER - VoIP - DOWNSTREAM - Výřez - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	173
136	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ JITTER - VoIP - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	173
137	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ JITTER - DATA - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	174
138	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ JITTER - DATA - DOWSTREAM - Výřez - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	174
139	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ JITTER - DATA- UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	175
140	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - VoIP - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	176
141	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - VoIP - DOWNSTREAM - Výřez - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	177
142	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - DATA - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	177
143	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - DATA - DOWNSTREAM - Výřez - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	178
144	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - IPTV - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	179
145	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - IPTV - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	180
146	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - VoIP - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	180
147	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - VoIP - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	181
148	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - DATA - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	181
149	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - DATA - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	182
150	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - IPTV - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	183
151	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - IPTV - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	184
152	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - VoIP - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	184
153	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - VoIP - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	185

154	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - DATA - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	185
155	ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - DATA - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	186
156	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - IPTV - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	187
157	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - IPTV - DOWNSTREAM - Výřez do 100 ms- bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo). . . .	188
158	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - IPTV - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	188
159	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - VoIP - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	189
160	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - VoIP - DOWNSTREAM - Výřez do 100 ms - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo). . . .	189
161	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - VoIP - UPSTREAM - bez op- tické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	190
162	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - DATA - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	190
163	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - DATA - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	191
164	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - IPTV - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	192
165	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - IPTV - Výřez do 300 ms - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	193
166	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - VoIP - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	193
167	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - VoIP- Výřez do 300 ms - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	194
168	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - DATA - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	194
169	ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - DATA- Výřez do 300 ms - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	195
170	Vstupní parametry RFC 6349 pro ADSL2+ (vlevo) a VDSL2 (vpravo).	197
171	Propustnost ve sestupném směru RFC 6349 - bez optické trasy (vlevo) a s přida- nou optickou trasou (vpravo).	198
172	Propustnost ve vzestupném směru RFC 6349 - bez optické trasy (vlevo) a s při- danou optickou trasou (vpravo).	198
173	Propustnost v sestupném směru RFC 6349 - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	199

174	Propustnost ve vzestupném směru RFC 6349 - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	200
175	Topologie pro měření IPTV.	201
176	Konkrétní snímek pro 0 m bez šumu (vlevo) a pro 900 m se šumem -90 dBm/Hz (vpravo) - h.265.	207
177	Konkrétní snímek pro 0 m bez šumu (vlevo) a pro 1800 m bez šumu (vpravo) - MPEG-2.	208
178	Topologie při měření kvality hovorů.	212
179	Topologie při měření přenosové rychlosti u datové služby.	224
180	Ukázka měření v programu BWMeter.	224
181	DATA - ADSL2+ - přenosová rychlost stahování - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	228
182	DATA - ADSL2+ - přenosová rychlost nahrávání - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	228
183	DATA - VDSL2 - přenosová rychlost stahování - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	232
184	DATA - VDSL2 - přenosová rychlost nahrávání - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).	232
185	Přihlášení k serveru ABACUS prostřednictvím programu VMware vSphere.	242
186	Virtuální stroje na serveru ABACUS.	242
187	Nastavení služby Data při testu Ethersam (VDSL2).	243
188	Nastavení služby IPTV při testu Ethersam (VDSL2).	243
189	Nastavení služby Voip při testu Ethersam (VDSL2).	244
190	Nastavení služby Data při testu Ethersam (ADSL2+).	244
191	Nastavení streamování videa - krok 1 a 2.	245
192	Nastavení streamování videa - krok 3 a 4.	245
193	Nastavení streamování videa - krok 5 a 6.	245
194	Nastavení streamování videa - krok 7.	246
195	Nastavení v programu IxChariot pro službu VoIP.	247
196	Průběh měření kvality hovoru.	247
197	Zobrazení web serveru pomocí prohlížeče.	248

Seznam tabulek

1	Porovnání technologií CWDM a DWDM. [30]	33
2	Porovnání variant PON	39
3	Definované hodnoty parametrů pro stabilní provoz dle MEF 23.1 - Performance Tier 1 Low, Medium.[44]	51
4	Porovnání HDSL na 1,2 a 3 párů. [3]	63
5	Možný překlenutelný útlum a vzdálenost pro SHDSL. [3]	64
6	Varianty ADSL.[3]	67
7	Varianty další generace ADSL. [10]	68
8	Přenosové profily VDSL2 pro Evropu.	71
9	QoS požadavky pro různé aplikace. [38]	74
10	Doporučené minimální přenosové parametry pro IPTV[48]	75
11	Šířka pásma jednotlivých standardů pro SDTV a HDTV. [38]	78
12	Klasifikace zpoždění pro přenos hlasu po datové síti.[39]	82
13	Přehled standardů pro kódování hlasu.[54]	84
14	Druhy MOS.[61]	90
15	Stupnice MOS.[61]	90
16	Hodnoty útlumu pro jednotlivé trasy.	105
17	Naměřené hodnoty CD při 1550 nm u jednotlivých optických tras.	107
18	Hodnoty PMD pro jednotlivé optické trasy.	108
19	Naměřené hodnoty vložných ztrát splitteru 1 : 32 (port 1 a 2).	109
20	Naměřené hodnoty výkonových úrovní v síti EPON.	110
21	Naměřené parametry pro 1491,789 nm (downstream).	112
22	Naměřené parametry pro vlnovou délku 1470,730 nm (upstream).	112
23	ADSL2+ downstream přenosové rychlosti na portu č. 10 v kombinaci s trasou a šumem.	114
24	ADSL2+ upstream přenosové rychlosti na portu č. 10 v kombinaci s trasou a šumem.	115
25	ADSL2+ rychlosti na portu č. 10 v kombinaci s trasou (Simulátor se 3 moduly).	116
26	VDSL2 downstream přenosové rychlosti na portu č. 12 v kombinaci s trasou a šumem.	117
27	VDSL2 upstream přenosové rychlosti na portu č. 12 v kombinaci s trasou a šumem.	117
28	VDSL2 downstream přenosové rychlosti na portu č. 10 v kombinaci s trasou a šumem.	119
29	VDSL2 upstream přenosové rychlosti na portu č. 10 v kombinaci s trasou a šumem.	120
30	VDSL2 downstream přenosové rychlosti na portu č. 9 v kombinaci s trasou a šumem.	121
31	VDSL2 upstream přenosové rychlosti na portu č. 9 v kombinaci s trasou a šumem.	122

32	VDSL2 downstream přenosové rychlosti na portu č. 8 v kombinaci s trasou a šumem.	123
33	VDSL2 upstream přenosové rychlosti na portu č. 8 v kombinaci s trasou a šumem.	124
34	VDSL2 downstream přenosové rychlosti na portu č. 7 v kombinaci s trasou a šumem.	125
35	VDSL2 upstream přenosové rychlosti na portu č. 7 v kombinaci s trasou a šumem.	126
36	Naměřené přenosové rychlosti u jednotlivých VDSL2 portů.	127
37	Kritéria pro vyhodnocení 1. fáze.[18]	163
38	Kritéria pro vyhodnocení 2. fáze.[18]	163
39	Kritéria pro vyhodnocení 3. fáze.[18]	165
40	Kritéria pro vyhodnocení výkonostního testu služeb.	166
41	Nastavení jednotlivých služeb pro testování hybridní sítě s ADSL2+.	166
42	Nastavení jednotlivých služeb pro testování hybridní sítě s VDSL2.	166
43	Video vzorky pro testování IPTV.	202
44	Hybridní síť s ADSL2+ - IP Průměrná hodnota bit rate (bez šumu).	203
45	Hybridní síť s ADSL2+ - IP Průměrná hodnota bit rate (-120 dBm/Hz).	203
46	Hybridní síť s ADSL2+ - IP Průměrná hodnota bit rate (-90 dBm/Hz).	204
47	Hybridní síť s ADSL2+ - IP Ztrátovost paketů (bez šumu).	204
48	Hybridní síť s ADSL2+ - IP Ztrátovost paketů (-120 dBm/Hz).	204
49	Hybridní síť s ADSL2+ - IP Ztrátovost paketů (-90 dBm/Hz).	205
50	Hybridní síť s ADSL2+ - IP Arrival Jitter (bez šumu).	205
51	Hybridní síť s ADSL2+ - IP Arrival Jitter (-120 dBm/Hz).	205
52	Hybridní síť s ADSL2+ - IP Arrival Jitter (-90 dBm/Hz).	206
53	Hybridní síť s VDSL2 - IP Průměrná hodnota bit rate (bez šumu).	208
54	Hybridní síť s VDSL2 - IP Průměrná hodnota bit rate (-120 dBm/Hz).	209
55	Hybridní síť s VDSL2 - IP Průměrná hodnota bit rate (-90 dBm/Hz).	209
56	Hybridní síť s VDSL2 - IP Ztrátovost paketů (bez šumu).	209
57	Hybridní síť s VDSL2 - IP Ztrátovost paketů (-120 dBm/Hz).	210
58	Hybridní síť s VDSL2 - IP Ztrátovost paketů (-90 dBm/Hz).	210
59	Hybridní síť s VDSL2 - IP Arrival Jitter (bez šumu).	210
60	Hybridní síť s VDSL2 - IP Arrival Jitter (-120 dBm/Hz).	211
61	Hybridní síť s VDSL2 - IP Arrival Jitter (-90 dBm/Hz).	211
62	Zvolené kodeky pro testování VoIP.	212
63	MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - bez šumu + bez optické trasy .	213
64	MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - bez šumu + optická trasa . . .	213
65	MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz + bez optické trasy.	214
66	MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz + s optickou trasou.	214
67	MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -110 dBm/Hz + bez optické trasy.	214
68	MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -110 dBm/Hz + s optickou trasou.	215

69	MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -100 dBm/Hz + bez optické trasy	215
70	MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -100 dBm/Hz + s optickou trasou .	215
71	MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -90 dBm/Hz + bez optické trasy .	216
72	MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -90 dBm/Hz + s optickou trasou.	216
73	MOS a R-faktor - ADSL2+ - Telebyte 458-3SL - modul 458-LM-HDE + bez optické trasy.	216
74	MOS a R-faktor - ADSL2+ - Telebyte 458-3SL - modul 458-LM-HDE + s optickou trasou.	217
75	MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - bez šumu + bez optické trasy . .	218
76	MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - bez šumu + optická trasa . . .	218
77	MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz + bez optické trasy.	219
78	MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz + s optickou trasou.	219
79	MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -110 dBm/Hz + bez optické trasy.	219
80	MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -110 dBm/Hz + s optickou trasou.	220
81	MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -100 dBm/Hz + bez optické trasy .	220
82	MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -100 dBm/Hz + s optickou trasou .	220
83	MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -90 dBm/Hz + bez optické trasy .	221
84	MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -90 dBm/Hz + s optickou trasou.	221
85	MOS a R-faktor - VDSL2 - Telebyte 458-3SL - modul 458-LM-HDE + bez optické trasy.	221
86	MOS a R-faktor - VDSL2 - Telebyte 458-3SL - modul 458-LM-HDE + s optickou trasou.	222
87	Naměřené přenosové rychlosti pro síť s ADSL2+ s optickou trasou a bez optické trasy (bez šumu).	226
88	Naměřené přenosové rychlosti pro síť s ADSL2+ s optickou trasou a bez optické trasy (-120 dBm/Hz).	226
89	Naměřené přenosové rychlosti pro síť s ADSL2+ s optickou trasou a bez optické trasy (-110 dBm/Hz).	226
90	Naměřené přenosové rychlosti pro síť s ADSL2+ s optickou trasou a bez optické trasy (-100 dBm/Hz).	227
91	Naměřené přenosové rychlosti pro síť s ADSL2+ s optickou trasou a bez optické trasy (-90 dBm/Hz).	227
92	Naměřené přenosové rychlosti pro síť s ADSL2+ s optickou trasou a bez optické trasy (modul 458-LM-HDE).	227
93	Naměřené přenosové rychlosti pro síť s VDSL2 s optickou trasou a bez optické trasy (bez šumu).	229
94	Naměřené přenosové rychlosti pro síť s VDSL2+ s optickou trasou a bez optické trasy (-120 dBm/Hz).	230

95	Naměřené přenosové rychlosti pro síť s VDSL2 s optickou trasou a bez optické trasy (-110 dBm/Hz).	230
96	Naměřené přenosové rychlosti pro síť s VDSL2 s optickou trasou a bez optické trasy (-100 dBm/Hz).	230
97	Naměřené přenosové rychlosti pro síť s VDSL2 s optickou trasou a bez optické trasy (-90 dBm/Hz).	231
98	Naměřené přenosové rychlosti pro síť s VDSL2 s optickou trasou a bez optické trasy (modul 458-LM-HDE).	231

1 Úvod

V současnosti mezi poskytovateli internetových služeb velmi vzrůstá oblíbenost spojení optické a metalické technologie, které ve výsledku tvoří hybridní či heterostrukturální síť. Hlavním důvodem je možnost znovu využít stávající metalické vedení a tím ušetřit náklady za budování přenosové trasy až k uživateli. Jedinou nevýhodou využití metalického vedení je limitní přenosová rychlost, která se vzrůstající vzdáleností klesá, proto se využívá kombinace s optickým vláknem. Pomocí optického vlákna je možné překonat vzdálenost v řádech stovek kilometrů. Čím blíže k uživateli je optické vlákno umístěno, tím je možné zákazníkovi nabídnout větší přenosovou kapacitu pro jeho služby. S rozvojem služeb souvisí samozřejmě i zájem o přenosovou kapacitu. Kromě datové služby, která je základem od vzniku internetu, se začíná prosazovat internetová televize neboli IPTV. Spolu s IPTV je velice populární služba internetového volání označovaná jako VoIP. Většina poskytovatelů nabízí všechny 3 služby v rámci balíčku Triple play.

Tato diplomová práce se věnuje konstrukci hybridní sítě a následným nasazením těchto Triple play služeb. Tato hybridní síť je zde zastoupena jak optickou, tak i metalickou částí. Optická část je tvořena systémem EPON typ 2 a WDM systémem, který je propojen s metalickou částí reprezentovanou technologií xDSL. V rámci xDSL systému byly využity technologie ADSL2+ a VDSL2. Pro metalické vedení byl využit simulátor vedení Spirent DLS 6900 a Telebyte 458-3SL s modulem 458-LM-HDE. Navíc simulátor Spirent DLS 6900 umožňoval přidat šum do simulované trasy, tudíž bylo možné sledovat změnu síťových parametrů na základě optické trasy, metalické trasy a metalické trasy se šumem.

Teoretická část práce obsahuje celkem 6 kapitol. Tyto kapitoly obsahují teoretické detaily a vlastnosti dílčích technologií, které je nutno znát pro vybudování požadované sítě. První kapitola se věnuje optickým přístupovým sítím. V této části nalezneme i část věnovanou hybridním sítím. Další dvě kapitoly se věnují detailněji určitým případům z první kapitoly, zejména pasivním optickým sítím PON a přístupovým sítím nové generace NGN/NGA. V další kapitole jsou teoreticky probírány populární varianty xDSL technologie. Teoretická část je završena šestou kapitolou věnující se službám Triple play.

Praktická část se zde zpočátku věnuje vybudováním hybridní (heterostrukturální) sítě. Tato část obsahuje podrobný seznam zařízení a prvků, které byly použity pro vybudování sítě. Navíc je zde popsána konfigurace různých zařízení. Další část obsahuje charakteristická měření pro jednotlivé systémy. Pro optickou část byla změřena chromatická disperze, polarizační vidová disperze, výkonová úroveň EPON a WDM, útlum atd. Pro xDSL systém byly zjištěny přenosové rychlosti pro různá nastavení šumu a metalické trasy. Praktická část dále pokračuje analýzou vybudované sítě pomocí testů RFC 2544, RFC 6349 a ITU-T Y.1564 (Ethersam). Zde je zkoumán vliv optické trasy s metalickou trasou (se šumem a bez šumu) na přenosové parametry sítě. Poslední část diplomové práce je věnována nasazením Triple play služeb a rovněž je zde zkoumán vliv přenosové trasy na jednotlivé parametry. Pro měření přenosových rychlostí u datové služby byl využit software BWMeter. Pro měření IPTV parametrů posloužil hardwarový přístroj EXFO

AEX 200/625. V práci byl použit pro vyhodnocení parametrů jako IP bit rate, IP jitter a IP ztrátovost. Hlasová služba VoIP byla vyhodnocena pomocí aplikace IxChariot na základě stupnice MOS a R-faktoru.

2 Optická přístupová síť

Příchod nových telekomunikačních služeb mění neustále požadavky na šířku použitého pásma přenosových médií, která souvisí s přenosovou rychlostí. Mnohdy je potřeba zaručit u velkých zákazníků přenosovou rychlost dosahující stovky Mbit/s až Gbit/s. V takových případech by pro nás metalické vedení bylo nedostačující. Naštěstí zdokonalení výroby optických vláken vedlo ke snížení útlumu, což se pozitivně projevilo v rozšíření překlenutelné vzdálenosti. Díky svým vynikajícím vlastnostem (přenosová rychlost, překlenutelná vzdálenost) se začala optická technologie využívat pro přístup telekomunikačních služeb, mluvíme tedy o optické přístupové síti OAN (Optical Acces Network). Dříve byla optická technologie součástí jen vysokorychlostních páteřních a metropolitních sítí, ale při současném tempu zvyšování přenosových požadavků na nové služby (např. sledování televize, telefonování, stahování dat z Internetu), bylo potřeba zavést optická vlákna i do části přístupové. Uživatelé mohou být připojeni tak, že optické vlákno je jen součástí vyšší úrovně přístupové sítě, na kterou poté navazuje další technologie směřující k uživateli (např. metalické vedení). Další možností je využití separátního optického vlákna umístěného mezi uživatelem a vyšší úrovní přístupové sítě. Potom je celá přístupová síť tvořena optikou. Optické přístupové sítě se v současné době stávají standardem v přístupových sítích vzhledem k flexibilitě a poměru cena - výkon. OAN je i investicí do budoucna, neboť má předpoklady pro zvyšování přenosové rychlosti. V další fázi vývoje OAN se očekává vytvoření optické vrstvy sítě začleňující optické zesilovače a další optické prvky jako:[3]

- WDM systémy obsahující transpondéry, WDM multiplexory.
- Optické vydělovací muldexy OADM a přepínače (cross-connect).

2.1 Základní funkční celky OAN

- Optické linkové zakončení - Optical Line Termination (OLT) je optické zařízení sloužící k zakončení sítě na straně poskytovatele. Zajišťuje konverzi elektrického signálu (od poskytovatele) na optický a také konverzi protokolů mezi sítěmi oddělenými právě OLT. Další důležitou funkcí je správa optických síťových jednotek (ONU). OLT zároveň plní i roli multiplexoru a demultiplexoru signálu přenášeného pomocí optického vlákna.
- Optické síťové zakončení - Optical Network Termination (ONT). Jedná se o koncové zařízení optické sítě na straně účastníka. Zajišťuje rozhraní mezi koncovými zařízeními účastníků a přístupovou sítí.
- Optická síťová jednotka - Optical Network Unit (ONU). Představuje speciální případ ONT. Odlišuje se tím, že zajišťuje převod optického signálu na technologii xDSL, Ethernet nebo WiFi a tím poskytuje rozhraní k připojení uživatele nebo i více uživatelů.

- Optická distribuční síť – Optical Distribution Network (ODN) je označení pro soubor všech prvků a prostředků, které se podílejí na přenosu mezi OLT a ONU. Nejčastěji je jako topologie využívána stromová struktura.[3]

2.2 FTTx

Fiber To The X (FTTx) představuje řešení optických přístupových sítí, jelikož rozlišujeme různé typy OAN podle umístění ONT či ONU jednotky v síti. Potom písmeno X označuje v názvu Fiber To The X místo zakončení optického vlákna. Přenos z ONU jednotky směrem k uživatelům dále pokračuje prostřednictvím různé technologie. Základní typy OAN, které rozlišujeme jsou:

- FTTC (Fibre To The Curb) - optické vlákno je přivedeno k venkovnímu rozvaděči v okolí skupiny domů nebo sídlišť. Umožňuje připojení až 20 účastníků.
- FTTB (Fibre To The Building) - optické vlákno je přivedeno až do budovy, většinou se optické zakončení nachází v suterénu budovy, kde jsou účastníci připojení pomocí vnitřních metalických rozvodů.
- FTTO (Fibre To The Office) - optické vlákno je přivedeno až do prostor zákazníků (kanceláří), kteří mají vysoké nároky na přenosovou rychlost.
- FTTH (Fibre To The Home) - optické vlákno je přivedeno přímo až do uživatelské zásuvky zákazníka.
- FTTN (Fibre To The Node) - je podobný variantě FTTC, ale na rozdíl od ní zvládne připojit až 300 účastníků. Rozvaděč se nejčastěji nachází ve venkovním prostředí. [3][4]

2.3 Přenos a rozdělení OAN

V optických přístupových sítích se signál přenáší v obou směrech (duplexní přenos). Obousměrný přenos lze zajistit několika způsoby:

- Simplexně s dělením SDM (Space Division Multiplex) - využívá dvě vlákna, každé vlákno je určené pro jeden směr přenosu.
- Duplexně s dělením WDM (Wavelength Division Multiplex) - je využito celkem jedno vlákno. Směry jsou odděleny vlnově, respektive vlnová délka pro upstream (1310 nm) je rozdílná ve srovnání s vlnovou délkou downstreamu (1490 nm).
- Duplexně s dělením FDM (Frequency Division Multiplex) - taktéž je využito jen jedno vlákno s tím rozdílem, že pro oba směry je využita stejná vlnová délka. Směry jsou odděleny frekvenčně.

Aby mohla přístupová síť obsloužit více uživatelů, než jen jednoho, bylo potřeba vyřešit otázku, jak docílit toho, aby bylo optické vlákno sdíleno mezi více účastníků v obou směrech. K takovým účelům se ve směru sestupném využívá metoda časového dělení TDM nebo frekvenčního dělení, které je zde označeno SCM (SubCarrier Multiplexing) a ne FDM. Pro přístup k optickému médiu ve směru opačném, využívá ONT/ONU jednotka metodu s časovým dělením TDMA či s kmitočtovým dělením SCMA.

Optické přístupové sítě můžeme rozdělit podle typu přenosu v distribuční síti (od OLT k ONU):

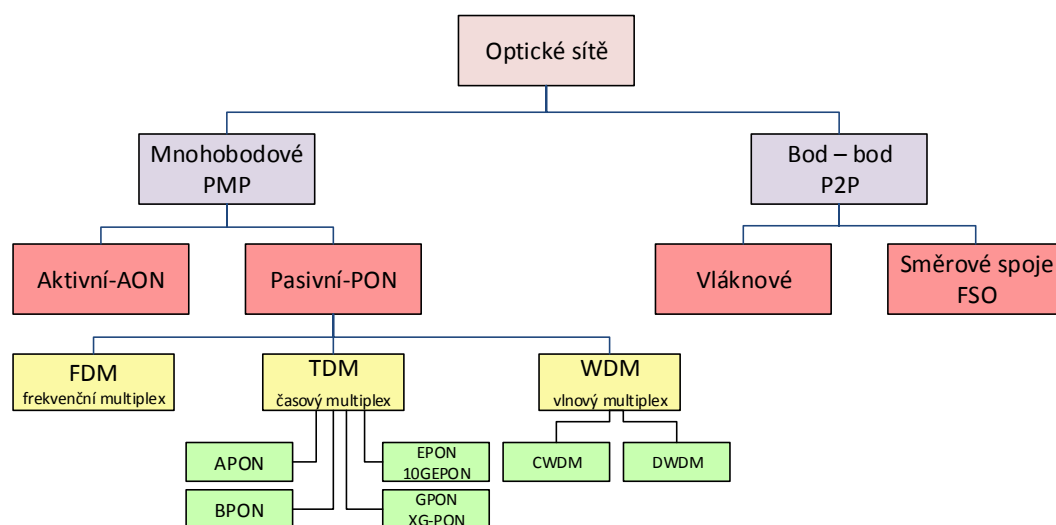
- bod - bod (P2P - Point to Point) - OLT je s ONU propojena přímo pomocí optického vlákna. Propojení může být realizováno individuálním spojením pomocí dvou vláken na základě SDH. V dalším případě lze využít i Ethernet.
- mnohabodové (P2MP - Point to Multi Point) - hojně využívané v přístupových sítích pro svou efektivnost při přenosu. Vhodným příkladem je pasivní optická síť, kde signál je rozbočen pomocí splitteru do více koncových bodů ve směru sestupném. V opačném směru jsou signály z ONU jednotek sdruženy do jednoho signálu směřujícího k OLT.

Mnohabodovou přístupovou síť lze rozdělit na základě charakteru optických komponent, které se nacházejí na trase mezi OLT a ONU:

- Aktivní optická síť (AON - Active Optical Network) - využívá v distribuční síti aktivní prvky, které vyžadují pro svou funkci zdroj energie (např. aktivní rozbočovače, multiplexery). AON síť většinou tvoří funkci vyšší úrovně přístupové sítě, na kterou je poté navázána nižší úroveň sítě v podobě technologií xDSL, CATV, WiMax, WiFi a dohromady obě úrovně tvoří hybridní síť. V porovnání s pasivní přístupovou sítí má obrovskou výhodu v překlenutelné vzdálenosti na trase mezi OLT a ONU, kde se mohou nacházet zesilovače, obnovovače signálu či aktivní rozbočovače, čímž je možné i využít většího dělicího poměru. Na druhou stranu AON se s těmito prvky stává z finančního hlediska náročnější než PON. Často bývá AON realizována pomocí technologie SDH.
- Pasivní optická síť (PON - Passive Optical Network) - využívá pasivní rozbočovač v ODN, který jen rozdělí výkon optického toku do více tras, na konci každé trasy je umístěna ONU jednotka, která přijme kompletní multiplexovaný signál od OLT a vybere jen daný kanál, který přísluší dané ONU jednotce. Ve směru opačném rozbočovač umožňuje signály slučovat od různých ONU jednotek. Více informací je popsáno v další kapitole. [3]

2.4 Přístupová síť WDM-PON

V současné době jsou hojně využívány systémy GPON a EPON, které využívají pro sdílený přístup většího počtu uživatelů časové dělení TDMA (Time Division Multiple Access). Maximální počet připojených uživatelů a maximální dosažitelná vzdálenost je závislá zejména na



Obrázek 1: Rozdělení optických sítí.[3]

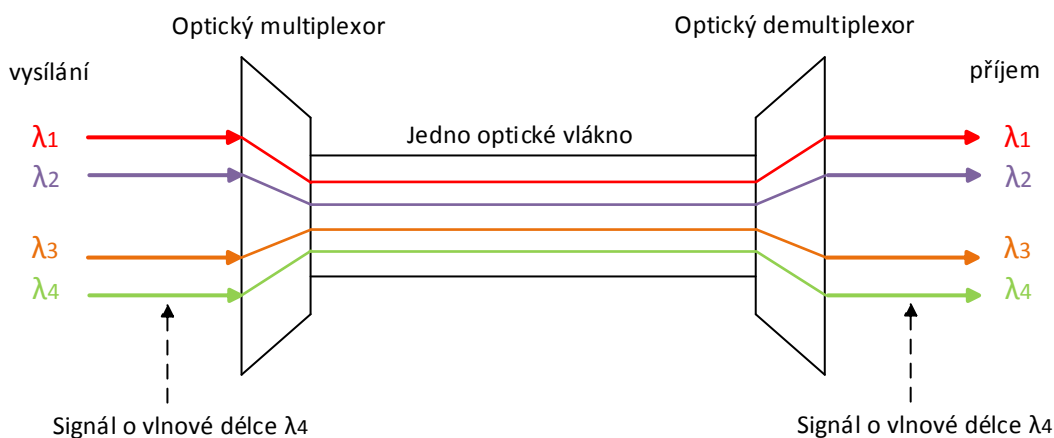
poměru rozbočení pasivního splitteru (rozbočovače), ale i na jeho vnitřní stavbě či na použitém materiálu. Bohužel z pohledu přenosových parametrů se PON síť založená na TDMA blíží k výkonostní hranici a právě technologie WDM tento problém řeší. Předpokládá se, že další generace PON sítí bude založena na vlnovém multiplexování WDM (Wavelength Division Multiplex), kde v jednom vlákně bude umístěno více vlnových délek a každá tato jedna vlnová délka bude tvořit samostatný kanál. Každému uživateli bude přidělen jednotlivý kanál o určité vlnové délce a celková přenosová kapacita systému bude určena součtem kapacit těchto kanálů. Tyto sítě se nazývají WDM-PON a vyznačují se daleko větší přenosovou kapacitou než PON síť s TDMA.

2.4.1 Princip a typy WDM

Vlnový multiplex (WDM, Wavelength Division Multiplex) je založen na myšlence sdružit několik optických kanálů do jednoho optického vlákna na základě vlnového dělení, nebo v podstatě frekvenčního oddělení. Každý přenosový kanál v systému WDM se tedy vyznačuje rozdílnou vlnovou délkou. Hlavní výhodou WDM je možnost znásobit přenosovou kapacitu optického vlákna. Celková přenosová rychlost F se zvýší W -krát, tj $F = W \cdot D$, při využití WDM s W vlnovými délkami (kanály). Pokud tedy bude využito celkem 16 vlnových délek s rychlostí přenosu 2,5 Gb/s na každou vlnovou délku, bude celková kapacita přenosu 40 Gb/s.

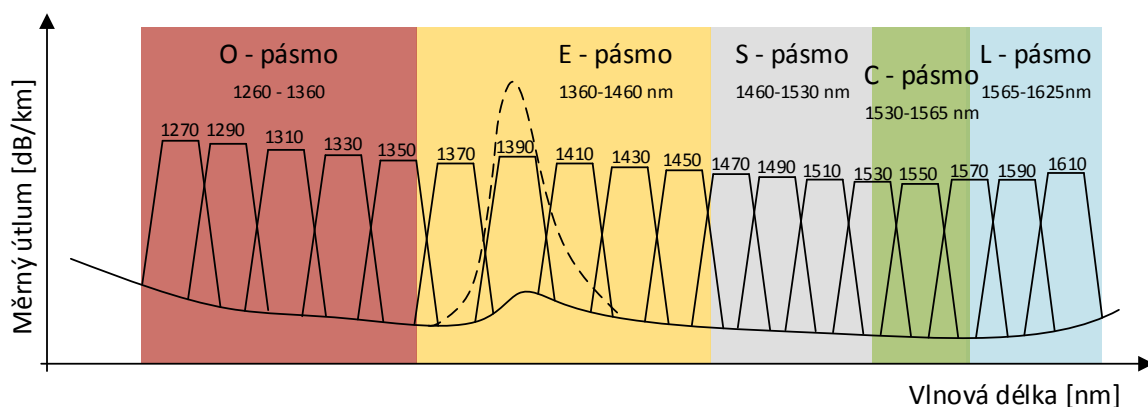
Na každou nosnou frekvenci (vlnovou délku) je namodulována přenášená informace. Poté tyto vlnové délky vstupují do multiplexoru, který zkombinuje všechny optické signály (kanály) o různých vlnových délkách do jednoho optického vlákna. Jako nejjednodušší řešení lze zvolit pro realizaci multiplexoru směrovou odbočnici v obráceném směru. Na přenosové trase je poté možno využít zesilovače. Nejefektivnější se jeví zesilovače pracující čistě na optickém principu bez nutnosti převádět optický signál na elektrický. Tyto zesilovače umožňují najednou zesílit celou

skupinu vlnových délek šířících se vláknem. Na konci přenosové trasy se nachází demultiplexor. Vlivem demultiplexoru dochází k demultiplexování (rozdělování) signálu podle frekvenčních pásem na signály v okolí jednotlivých nosných frekvencí. Poté jsou dané signály dále zpracovány jednotlivými přijímači. [31]



Obrázek 2: Princip vlnového multiplexu.

První návrh technologie WDM proběhl už v roce 1970, ale až roku 2002 byl standardizován (ITU-T G.694.1 a ITU-T G.694.2). Na základě standardizace došlo k určení vlnových délek pro realizaci a k rozdělení WDM na dvě varianty CWDM (Coarse WDM) a DWDM (Dense WDM). Obě varianty se liší jen ve vzájemném odstupu vlnových délek.



Obrázek 3: Kanály CWDM definované ve specifikaci ITU-T G.694.2.[29]

Varianta **CWDM** byla popsána ve specifikaci ITU-T G.694.2, kde byly definovány jednotlivé vlnové délky v rozsahu 1270 nm (první kanál) až 1610 nm (poslední kanál). Odstup jednotlivých kanálů pro hrubé CWDM je stanoven na 20 nm s tolerancí nosné $\pm 6,5$ z důvodu závislosti vlnové délky na teplotě, a proto je CWDM vhodným řešením při využití méně kvalitních optických zdrojů. Například je možno využít laserové diody bez nároku na chlazení. Odstupy mezi kanály

jsou v podstatě větší ve srovnání s DWDM. Při využití standardního jednovidového vlákna 9/125 je definováno 18 kanálů které jsou rozděleny do následujících pásem [33]:

- pásmo O (Original): vlnové délky 1260-1360 nm, kanály 1-5
- pásmo E (Extended): vlnové délky 1360-1460 nm, kanály 6-10 (počítá se s optickým vláknem s potlačenými ionty OH^- , v obrázku č. 3 naznačeno čárkovaně)
- pásmo S (Short): vlnové délky 1460-1530 nm, kanály 11-14
- pásmo C (Conventional): vlnové délky 1530-1565 nm, kanál 15
- pásmo L (Long): vlnové délky 1565-1625 nm, kanály 16-18

Obvykle se využívají kanály 2 až 5. Kanály 14 až 17 se využívají při přenosu na delší vzdálenosti nebo při vyšších útlumech. Pro konstrukci filtrů se využívá technologie tenkovrstvých filmů, která již byla osvědčena u DWDM filtrů. Na rozdíl od DWDM je využito menšího množství napařených vrstev pro konstrukci CWDM filtrů, což má za následek nižší cenu. Technologii CWDM lze v případě potřeby vhodně zkombinovat se systémem DWDM.

Druhou variantou je systém s hustým vlnovým multiplexem **DWDM**. V doporučení ITU-T G.694.1. jsou definovány jednotlivé přenosové kanály v rozsahu vlnových délek od 1490 nm do 1620 nm (tzv. S, C a L pásmo). Technologie DWDM se hlavně využívá na dálkových optických trasách a pro svou funkci vyžaduje precizní laserové chlazené zdroje a další náročné komponenty (EDFA zesilovače, kompenzátory disperze apod). Oproti variantě CWDM využívá DWDM menší odstupy mezi jednotlivými kanály. Díky tomu je možné do stejného pásma umístit větší množství kanálů (vlnových délek). Jednotlivé odstupy mezi kanály se pohybují v rozmezí 0,8 až 0,1 nm. Rozestup menší než 0,2 nm je považován za **UDWDM** (Ultra-Dense WDM). Jelikož rozestupy mezi kanály jsou velmi malé, tak pro realizaci DWDM stoupají požadavky na použité optické zdroje. Vhodné jsou aktivně chlazené lasery. Naopak LED zdroje jsou pro DWDM zcela nepoužitelné. V PON sítích se pro využití DWDM uvažuje o pásmech C a L s odtupem 0,8 nm mezi kanály, což by umožnilo přenos 32 až 80 vlnových délek. V rámci dálkového a páteřního spoje se využívají C, L a S pásma. Při nasazení v metropolitních sítích je vhodné DWDM omezit pouze na C pásmo (1530-1565 nm), jelikož pro C pásmo existují cenově dostupné komponenty (výměnné transceivery DWDM v provedení SFP, XFP, Xenpak a EDFA zesilovače pro C pásmo) [32]. Rozestupy mezi kanály DWDM mohou být následující:

- 12,5 GHz (odpovídá 0,1 nm)
- 25 GHz (0,2 nm)
- 50 GHz (0,4 nm)
- 100 GHz a více (0,8 nm)[29]

Tabulka 1: Porovnání technologií CWDM a DWDM. [30]

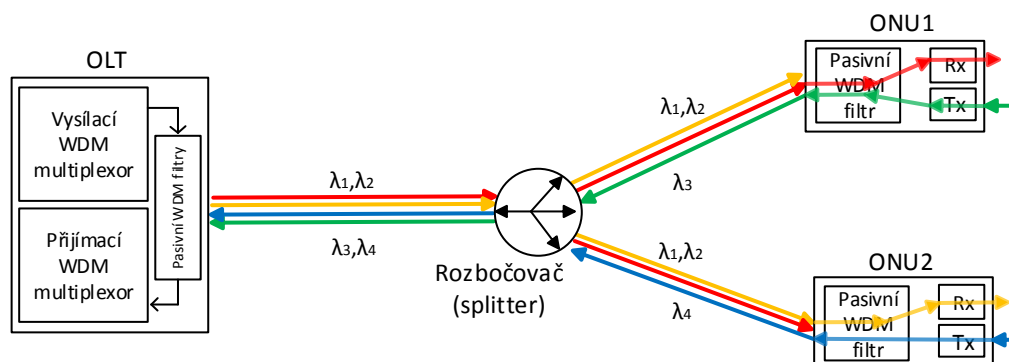
Aplikace	CWDM - metropolitní síť	DWDM - metropolitní, regionální síť	DWDM - dálkové spoje
Kanály na vlákno	4 - 16	32 - 80	80 - 160
Použité spektrum	Pásma O,E,S,C,L	Pásma C,L	Pásma C,L,S
Vzdálenost mezi kanály	20 nm	0,8 nm	0,4 nm
Kapacity vlnové délky	1,5 Gbit/s	10 Gbit/s	10-40 Gbit/s
Kapacita vlákna	20 - 40 Gbit/s	100 - 1000 Gbit/s	Tbit/s
Typ laseru	Nechlazený DFB	Chlazený DFB	Chlazený DFB
Dosah	Do 50 - 80 km	Stovky km	Tisíce km
Zesilovač	žádný	EDFA	EDFA, Raman

Dále se můžeme setkat s technikou **WWDM** (Wide WDM). Jedná se o široký vlnový multiplex, u něhož jsou jednotlivé rozestupy mezi kanály větší než 20 nm (širší). Většinou je využíván v oblasti 1300 nm pro jednovidová vlákna nebo v oblasti 850 nm pro vícevidová vlákna. Nejčastěji je aplikován pro přenos Gigabitového a 10Gigabitového Ethernetu. [33]

2.4.2 Varianty WDM-PON

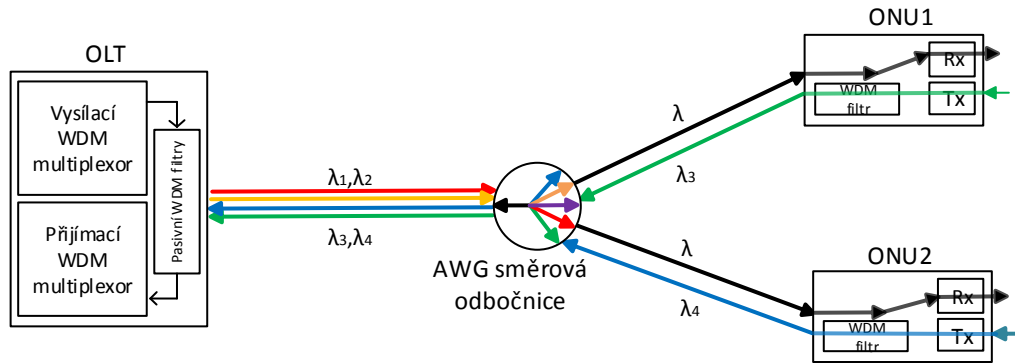
Vzhledem k celkovým nákladům a nabízené přenosové rychlosti na jednu koncovou jednotku ONU se ujal následující 3 návrhy WDM-PON sítě:

- **WDM-PON s pevným přiřazováním vlnových délek** - První varianta WDM-PON využívá pevného přiřazování vlnových délek, kde je každé koncové jednotce individuálně přidělena jedna vlnová délka. To znamená, že pokud do optické sítě bude připojeno 16 ONU jednotek, tak ve vzestupném směru od OLT se bude šířit celkem 16 vlnových délek (kanálů). Jakmile tyto vlnové délky dorazí na pasivní výkonový rozbočovač, dojde pouze k rozdělení optického signálu (výkonu) do všech výstupních směrů, kde se nacházejí jednotlivé ONU jednotky. Vlivem rozdělení optického výkonu rozbočovačem, obdělí každá ONU jednotka signál na všech vlnových délkách. Pro vydělení správné vlnové délky je využit pevně nastavený filtr, který je součástí ONU jednotky. Z hlediska architektury WDM-PON tvoří soubor P2P spojení. V opačném směru, tedy ve vzestupném směru, má každá ONU jednotka přiřazenou svou individuální vlnovou délku, na které vysílá jen daná ONU jednotka směrem k OLT. Navíc v systému WDM-PON je vyhrazena 1 vlnová délka, na které je vysílán broadcastový provoz určený pro všechny ONU jednotky. Nevýhodou této varianty je, že ke každé ONU jednotce je šířen obsah od každé ONU jednotky, proto je nezbytné zajistit šifrování dat. Dalším problémem je i velký vložný útlum způsobený pasivním rozbočovačem, který je přímo úměrný počtu rozdělení signálu a ovlivňuje tak počet připojených ONU. Na druhé straně je optický rozbočovač jednoduchý a cenově přijatelný. [29]



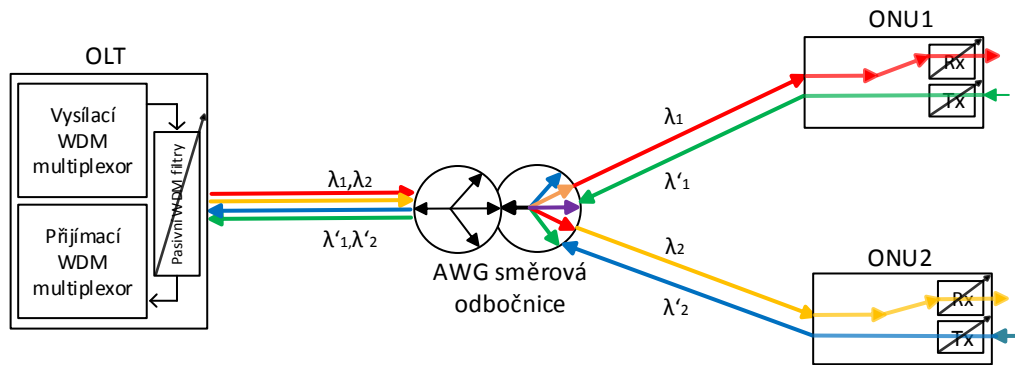
Obrázek 4: WDM-PON s pevným přiřazováním vlnových délek.[29]

- WDM-PON s AWG odbočnicí** - Druhá varianta využívá směrové odbočnice na principu vydělování vlnových délek pomocí metody AWG (Arrayed Waveguide Gratings). Na vstup AWG odbočnice vysílá OLT jednotka optický signál opět ve formě vlnového multiplexu, který obsahuje soubor vlnových délek. Na rozdíl od výkonového rozbočovače nejsou všechny vlnové délky posílány k jednotlivým ONU, ale pomocí AWG směrové odbočnice dochází k vydělování vlnových délek z multiplexu a k ONU jsou přiváděny dané nosné na stejné vlnové délce, jelikož všechny vstupující vlnové délky jsou vlivem AWG odbočnice vlnově přeloženy na jednotnou vlnovou délku. V sestupném směru je princip stejný jako u předešlého řešení, tedy každá ONU jednotka vysílá na rozdílné vlnové délce než ostatní ONU koncové jednotky. Poté jsou jednotlivé signály směrem k OLT multiplexovány pomocí AWG. Výhodou AWG je nízký vložný útlum, který se pohybuje kolem 5 dB a není závislý na počtu odchozích směrů. Další výhodou je nepotřebnost vlnového filtru na vstupu ONU, a proto byl odstraněn. Navíc filtr zvyšoval celkový útlum, což se po jeho odstranění už neděje. [29]
- WDM-PON s kaskádním zapojením** - Třetí možnost WDM-PON využívá kaskádní zapojení. Jedná se o kombinaci metody AWG směrových odbočnic a pasivních optických rozbočovačů. Jednotlivé výstupy výkonového rozbočovače jsou propojeny s AWG odbočnicí nebo i s několika odbočnicemi kaskádně. Při využití většího množství odbočnic se zvýší i přesnost vydělovaných vlnových délek, díky tomu by bylo možné použít hustý vlnový multiplex DWDM. Dále při použití volitelných kanálů (vlnových délek) a laditelných filtrů, které jsou součástí univerzálních koncových jednotek, je možno přidělovat kanály na základě aktuální potřeby a požadavků. Tento mechanismus se nazývá DWA (Dynamic Wavelength Assignment). Ve vzestupném směru k OLT je možné vyhradit jeden společný sdílený kanál pro všechny ONU jednotky za použití přístupu TDMA. Tato metoda využí-



Obrázek 5: WDM-PON s využitím AWG odbočnice.[29]

vaná ve vzestupném směru se nazývá CPON (Composite PON). [29]



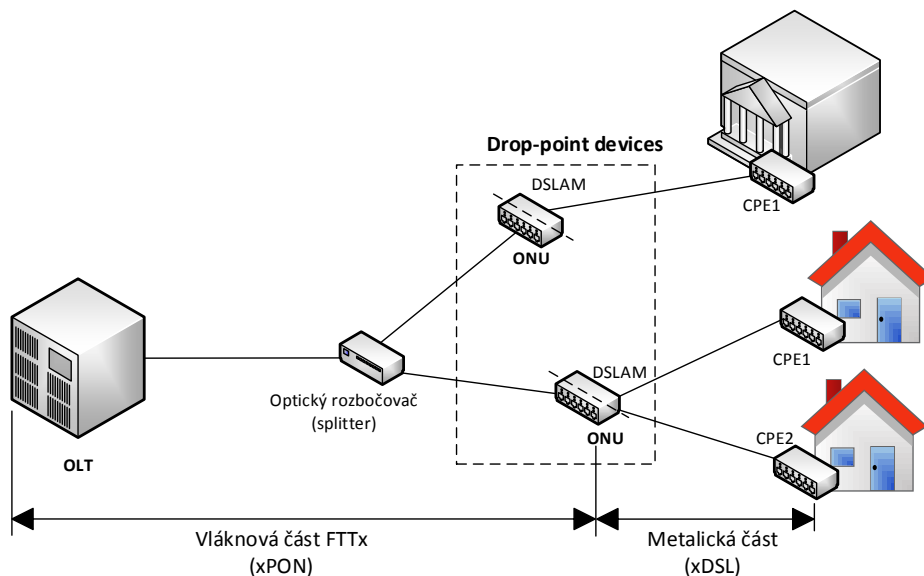
Obrázek 6: Kaskádní zapojení AWG odbočnice a pasivního splitteru.[29]

2.5 Hybridní síť xPON/xDSL

Jedná se o kombinaci optické technologie a technologie provozované na metalickém symetrickém vedení. Optická technologie je tvořena pasivní optickou sítí xPON (Passive Optical Network), kde písmeno x označuje použitý standard této technologie. Druhou technologií, která hraje významnou roli v této hybridní síti je digitální účastnická přípojka xDSL (Digital Subscriber Line). Propojení těchto dvou technologií je situováno do různého místa na přenosové trase, které specifikuje označení FTTx. Může se jednat například o FTTC(Curb), kde rozvaděč je umístěn v okolí sídliště. V rozvaděči se nachází ONU jednotka (součást PON), která převádí optický signál na elektrický signál a ten je poté veden do zařízení DSLAM (součást xDSL). V opačném směru

ONU jednotka převádí elektrický signál na optický. Schéma této hybridní technologie je zobrazeno na obrázku č.7.

Na obrázku je možno vidět pasivní optickou síť PON a její nedílnou součást - optické linkové zakončení OLT, které se nachází na straně poskytovatele. Optický signál je od OLT veden pomocí optického vlákna až do určitého místa (FTTx), kde se nachází drop-point zařízení. Každé drop-point zařízení je tvořeno kombinací ONU jednotky a DSL přístupového multiplexoru (DSLAM). Poté přes DSLAM je každé drop-point zařízení spojeno s více uživateli DSL, respektive se zákaznickými zařízeními CPE, které jsou zde reprezentovány DSL modemy.



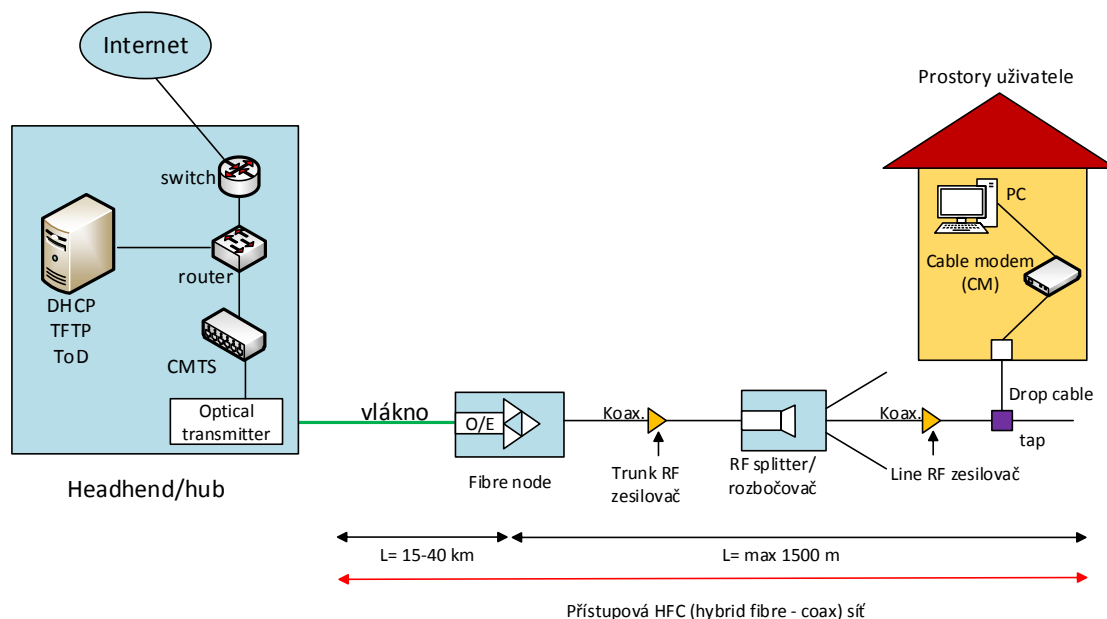
Obrázek 7: Hybridní přístupová xPON/xDSL síť.[67]

2.6 Hybridní opticko-koaxiální síť HFC

Jedná se o širokopásmovou síť, která kombinuje optické vlákno a koaxiální kabel. Tato hybridní síť byla nasazená operátory kabelové televize již na začátku devadesátých let. Z počátku byly pro účely distribuce TV signálu HFC sítě jen jednosměrné, jelikož tyto sítě měly dostatek kapacity a potenciálu i pro další služby, později se vyvinuly v obousměrné sítě, například pro poskytování internetového přístupu. Pro vytvoření obousměrné datové sítě skrze HFC síť je velmi důležitým prvkem na straně poskytovatele zařízení CMTS (Cable Modem Termination System) a kabelový modem CM (Cable Modem), který se nachází na straně uživatele. Každé CMTS zařízení má pod sebou určitý počet modemů (skupinu) a všechny tyto modemy sdílí jednu společnou kapacitu. Pro komunikaci mezi CMTS zařízením a kabelovým modemem CM slouží standard DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification).

Na obrázku č. 8 je zobrazena architektura technologie DOCSIS, která využívá právě HFC síť. Nejvyšším prvkem je operační centrum (Headend), které se nachází na straně poskytovatele. Prvky Headendu jsou napojeny pomocí switchu a směrovače do internetu. Pokud poskytovatel

nabízí i telefonní služby na bázi VoIP, je součástí Headendu i brána pro IP telefonii. Tato brána je potom napojena na klasickou PSTN síť. Součástí Headendu mohou být i určité servery například DHCP a TFTP, které slouží pro konfiguraci modemu. Nejdůležitější je zde zařízení CMTS. Za tímto zařízením následuje optický vysílač a přijímač, který převádí elektrický signál na analogový optický signál a naopak. Poté je již signál přenášen HFC sítí. Zde je signál přenášen optickým vláknem k optickému uzlu (Optical Node), kde je optický signál převeden na elektrický RF (radio frequency) signál a poslán přes koaxiální vedení směrem k uživatelům. Na cestě k uživatelům lze uplatnit zesilovače signálů. [66] [68]



Obrázek 8: DOCSIS architektura společně s HFC sítí.[67]

3 TDM Passive Optical Network

Jedná se o pasivní optickou síť (PON), která je využívána jako přístupová síť tvořená pasivními optickými prvky, jako jsou optická vlákna, konektory, rozbočovače, odbočnice. Pro sdílení jednoho optického vlákna mezi více uživateli je využit časový multiplex TDM, kde je jednotlivému uživateli přidělen určitý time slot. Jak již bylo řečeno v předešlé kapitole, důležitou komponentou je zde optický rozbočovač neboli splitter, což je pasivní rozdělovač umožňující sdílet přenosovou kapacitu jednoho optického vlákna více uživatelům. Jednoduše rozděluje optický signál do několika směrů, kde na konci každého směru se nachází ONU jednotka s připojeným uživatelem. To se děje ve směru od OLT k ONU. V opačném směru splitter slučuje signály od různých uživatelů (směrů) do jednoho optického vlákna. Nevýhodou je, že splitter způsobuje na trase vložný útlum, který závisí na počtu rozbočení. Rozbočením se tudíž ztrácí optický výkon multiplexovaného signálu v sestupném směru. Překlenutelná vzdálenost je tedy ovlivněna jak počtem rozbočení tak počtem spojek, konektorů, vlastností optických vláken a využití topologie sítě. Na optické trase nedochází k regeneraci nebo zesílení signálu, což je rozdíl ve srovnání s aktivními optickými sítěmi. V současné době existují různé varianty TDM PON, odlišující se využívaným protokolem či mechanismem na druhé vrstvě RM-OSI modelu. Základní rozdělení standardů TDM PON vypadá následovně:[5]

- APON, BPON - jedná se o starší generaci PON využívající přenos pomocí ATM standardu (Asynchronous Transfer Mode).
- EPON - momentálně hodně využívaná. K přenosu jsou využity ethernetové rámce. Někdy označováno jako GEAPON vzhledem k gigabitové rychlosti.
- 10GEAPON - zpětně kompatibilní s EPON. Umožňuje symetrické a asymetrické rychlosti až 10 Gbit/s.
- GPON - vyznačuje se vylepšeným protokolem GEM (GPON Encapsulation Method). Starší generace umožňovala přenos jen ATM buněk.
- XG-PON (10G-PON) - je od roku 2010 nástupcem GPON. Dosahuje podobných rychlostí jako GEAPON.

3.1 APON, BPON

APON (ATM Based PON) nese označení ITU-T G.983.1 a roku 1998 se stal prvním PON standardem. K přenosu informací jsou využity ATM buňky. Nabízené rychlosti jsou dostupné ve dvou variantách (symetrické, asymetrické). Při využití symetrických rychlostí bylo možné dosáhnout přenosové rychlosti 155,2 Mbit/s (později došlo k rozšíření na 622,08 Mbit/s). V asymetrickém režimu bylo možno dosáhnout v sestupném směru rychlosti 622,08 Mbit/s a ve směru vzestupném 155,2 Mbit/s. Při přenosu jsou buňky seskupovány do rámců následovně:

Tabulka 2: Porovnání variant PON

varianta PON	APON/BPON	GPON	EPON(typ 2)	10GEPON	XG-PON
standard	ITU-T G.983	ITU-T G.984	IEEE 802.3ah	IEEE 802.3a	ITU-T G.987
protokol na 2.vrstvě	ATM	ATM/GEM	Ethernet	Ethernet	XGEM
max. přenosová rychlost (downstream)	622/155 Mbit/s	2,488 Gbit/s	1,25 Gbit/s	10 Gbit/s	10 Gbit/s
max. přenosová rychlost (upstream)	622/155 Mbit/s	2,488 Gbit/s	1,25 Gbit/s	10 Gbit/s	2,5 Gbit/s
vlnová délka [nm] (downstream)	1480-1500	1480-1500	1480-1500	1575-1580	1575-1580
vlnová délka [nm] (upstream)	1260-1360	1260-1360	1260-1360	1260-1280(1360)	1260-1280
max. počet připojených uživatelů	32	64	32	32	64
logický/fyzický dosah sítě [km]	20/20	60/10,20	20/10,20	-/20	60/20

- Ve směru sestupném - při rychlosti 155,2 Mbit/s jsou přeneseny 2 rámce. Každý rámec se skládá z buňky PLOAM (pro řízení operací fyzické vrstvy), která je následována 27 buňkami obsahující uživatelská data. Tudíž je celkem přeneseno 56 ATM buněk po 53 bajtech. Při zvýšení rychlosti na 622,08 Mbit/s se počet přenesených buněk zvýší čtyřnásobně, bude tedy přeneseno 8 rámců (224 ATM buněk obsahující 8 PLOAM buněk).
- Ve směru vzestupném - při rychlosti 155,2 Mbit/s se přenosový rámec skládá z 53 ATM buněk, kde 1 buňka má velikost 56 bajtů, z nichž 3 bajty tvoří záhlaví. ONU jednotka pouze vysílá ve stanoveném časovém intervalu, který je specifikován v PLOAM buňkách v sestupném směru. Při využití rychlosti 622,08 Mbit/s dochází taktéž ke čtyřnásobnému navýšení množství vyslaných buněk.

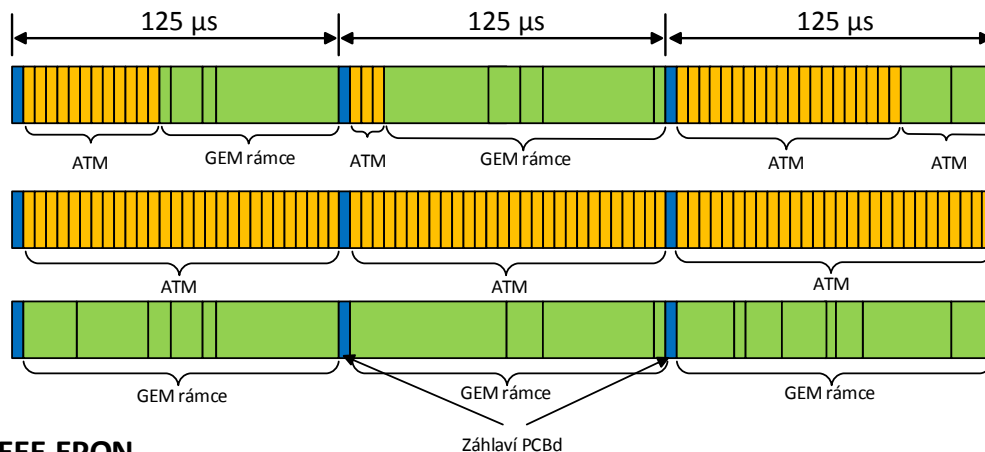
BPON (Broadband PON) specifikace ITU-T G. 983.3 vznikla v roce 2001 jako rozšíření předchozího standardu APON. Využívá i stejné přenosové rychlosti, ale ve srovnání s APON se vyznačuje detailnějšími řídicími protokoly a navíc přidává možnost dynamické alokace přenosového pásma. [6][3]

3.2 GPON/XG-PON

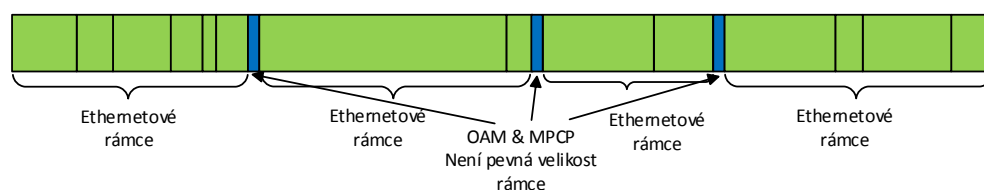
GPON (Gigabit PON) byl standardizován roku 2003 s označením ITU-T G.984. Jako nový standard přinesl větší přenosové rychlosti, které byly dostupné v symetrické a asymetrické variantě. Přenosová rychlost v symetrickém režimu dosahovala až 2 488,32 Mbit/s nebo 1 244,16 Mbit/s, zatímco u asymetrické volby bylo možné setkat se s rychlostmi ve vzestupném směru 155,52 Mbit/s, 622,08 Mbit/s, 1244,16 Mbit/s. Dále se vyznačuje vylepšeným šifrováním a podporuje rozdílné protokoly druhé vrstvy. Rámce jsou tvořeny buď ATM buňkami, nebo jsou tvořeny metodou GEM (GPON Encapsulation Method), kdy jsou data zapouzdřena do GEM rámců. Metoda GEM je vhodná pro přenos různých typů dat, včetně Ethernetových rámců. Hlavní výhodou GEM rámců je, že umožňuje přenos většího množství uživatelských dat při stejné režii jako u ATM buněk, čímž roste efektivnost přenosu a tyto GEM rámce mohou mít proměnlivou

délku. ATM buňky, GEM rámce či jejich fragmenty, jsou přenášeny společně nebo samostatně v rámcích s pevnou délkou 125 μ s (viz obrázek č. 9). GPON je zpětně kompatibilní s předchozími standardy (APON, BPON).

ITU-T GPON



IEEE EPON



Obrázek 9: Ukázka formátu přenosových rámců GPON a EPON.[8]

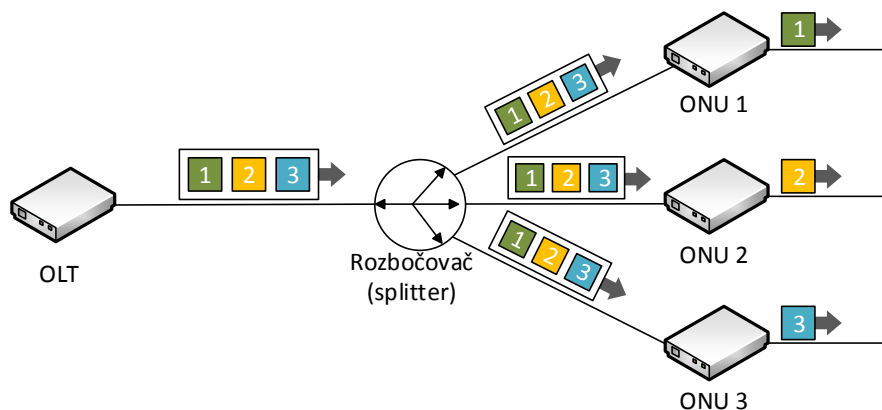
Roku 2010 navázal na vývoj GPON nový standard ITU-T G.987, označován jako XG-PON (také zvaný jako 10G-PON). Došlo k navýšení přenosových rychlostí, které jsou nabízeny jen v asymetrickém režimu. V sestupném směru je možné dosáhnout rychlosti 10 Gbit/s. V opačném směru je čtyřikrát menší a to 2,5 Gbit/s. Pro fungování XG-PON a GPON lze využít stejnou optickou distribuční síť. Pro tyto účely došlo ke změně vlnových délek ve dvou směrech. Ve směru downstream je vyhrazeno pásmo 1575 nm - 1570 nm (u GPON 1480nm-1500 nm). Pásmo určené pro upstream se nachází v rozmezí 1260 nm - 1280 nm. Aby toto pásmo nezasahovalo do pásma u GPON, bylo potřeba pásmo u GPON upravit z 1260-1360 nm na 1290-1330 nm. Nově došlo k vylepšení starší verze zapouzdřovacího protokolu GEM, který u GPON nese označení XGEM (XG-PON Encapsulation Method). U XGEM došlo ke mnoha zlepšením a inovacím, např. ke zvětšení adresního pole pro možnost připojení většího množství koncových jednotek, propracovanějšímu fragmentování rámců, možnosti vyhrazení individuální přenosové kapacity, šifrování a zabezpečení. [5][12]

3.3 EPON

Jak již bylo řečeno, EPON neboli Ethernet PON je přístupová síť, která využívá k přenosu ethernetové rámce a stala se globálně nejúspěšnější optickou pasivní sítí oproti ostatním provedení PON. Ve srovnání s GPON jsou přenášeny ethernetové rámce bez jakýchkoliv změn nebo úprav. Není třeba dodatečné úpravy a zapouzdření. Pracovní název nese označení IEEE 802.3ah. Na počátku vzniku v roce 2004 byly navrženy dva typy tohoto standardu - 1000BASE-PX10 a 1000BASE-PX20. Ve většině případů se využívá označení EPON typ 1 a EPON typ 2. Rozdíl mezi těmito typy je jen ve fyzickém dosahu sítě a v počtu koncových účastníků, ke kterým je signál rozbočen. EPON typ 2 disponuje lepšími parametry. Zvládne 32 koncových uživatelů s maximálním fyzickým dosahem sítě 20 km. Oproti tomu, typ 1 zvládne jen polovinu. Dosahuje jen maximální fyzické vzdálenosti sítě 10 km a to jen maximálně pro 16 uživatelů. Další parametry jsou shodné. V Číně vznikla varianta zvaná turbo EPON, která dosahovala rychlosti až 2,5 Gbit/s symetricky. Tato varianta se do zbytku světa nerozšířila a z tohoto důvodu nebyla ani standardizována. [7][3]

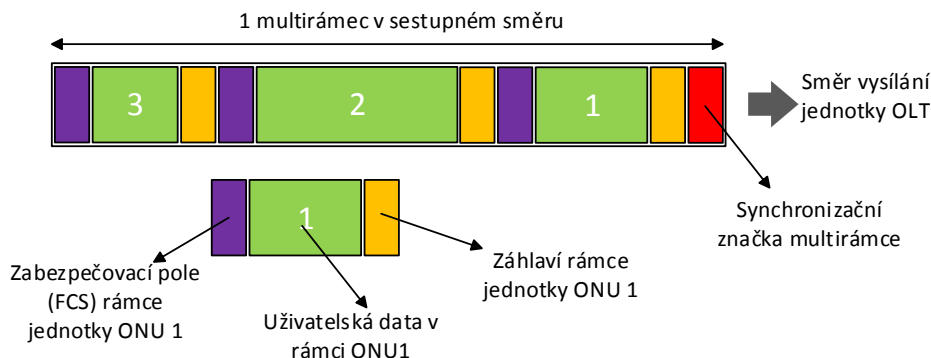
3.3.1 Řešení přenosu EPON

Přenos u EPON probíhá obousměrně. V každém směru je využita rozdílná vlnová délka. Pro směr sestupný od OLT k uživatelům byl stanoven interval v rozmezí 1480-1500 nm, v opačném vzestupném směru je to interval 1260-1360 nm. Větší tolerance vlnové délky ve vzestupném směru je zapříčiněna horší kvalitou laseru umístěného v ONU jednotce, u kterého se většinou mění poloha spektrální čáry v závislosti na teplotě, vlhkosti i stáří. V obou směrech EPON disponuje 1,25 Gbit/s přenosovou rychlostí. Vysílání dat ve směru sestupném probíhá pomocí multirámců, které si OLT vytváří a poté je také vysílá. V multirámcích jsou pomocí TDM časového multiplexu řazeny příspěvky pro jednotlivé koncové jednotky ONU. Multirámec poté prochází přes pasivní rozbočovač, který propouští multirámec do všech směrů na jejíchž koncích jsou připojené ONU jednotky. Každá ONU jednotka si vybere jen tu část multirámce, která je jí určena. [7] Na



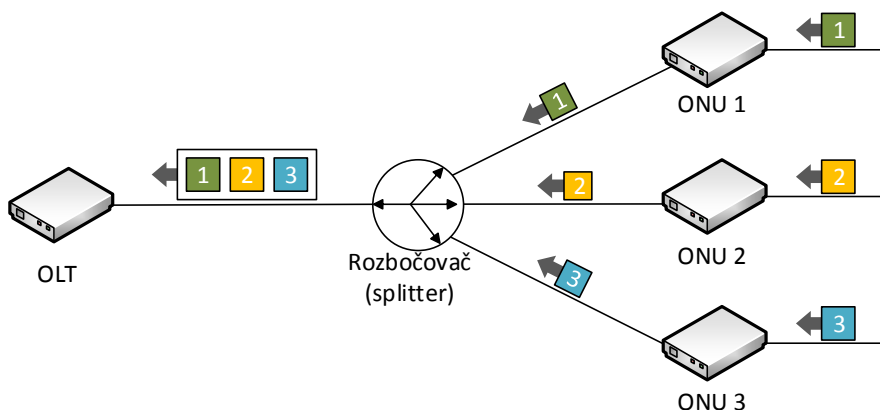
Obrázek 10: Přenos v sestupném směru.[7]

začátku každého multirámce se nachází synchronizační značka. Uvnitř je multirámec tvořen z datových jednotek, které patří jednotlivým uživatelům a každá tato jednotka je tvořena kromě uživatelských dat i záhlavím a zabezpečovacím polem.



Obrázek 11: Schéma multirámce v sestupném směru.[7]

Ve směru sestupném, aby nedocházelo ke kolizím při vysílání jednotlivých ONU jednotek, je každé ONU jednotce přidělen časový interval, ve kterém lze vysílat rámce směrem k OLT. Funkce tohoto systému je podmíněna synchronizací ONU jednotky s OLT.

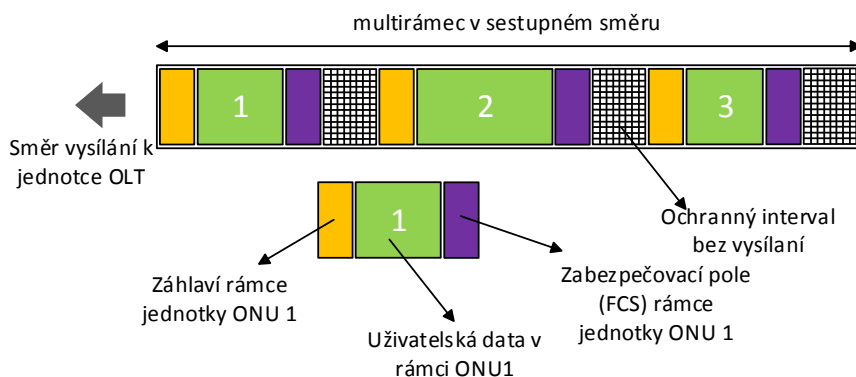


Obrázek 12: Přenos ve vzestupném směru.[7]

Ve výsledném multirámci jsou jednotlivé rámce odděleny ochranným intervalem.

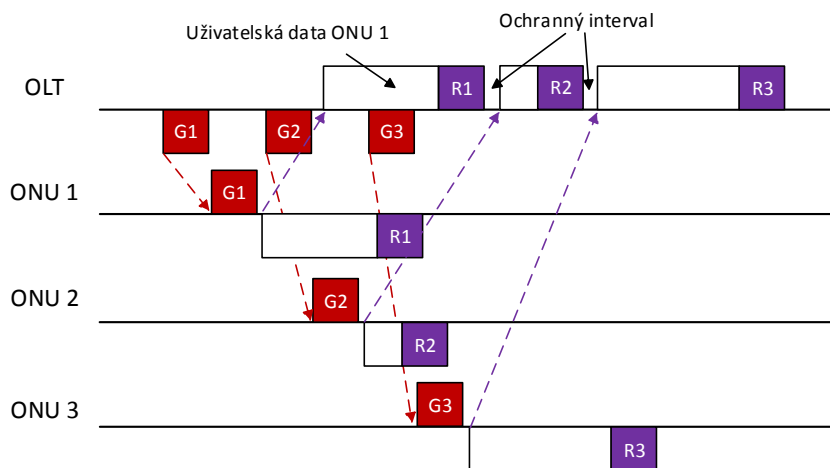
3.3.2 MPCP protokol

Součástí standardu EPON je protokol MPCP (Multi-Point Control Protocol), který zde hraje velmi významnou roli. Slouží pro komunikaci mezi OLT a ONU jednotkou. Tato komunikace je velmi důležitá pro správu, řízení, registraci koncových jednotek ONU a přidělování dynamických přenosových kapacit v multirámci ve vzestupném směru. OLT jednotka opakovaně zasílá na všechny ONU jednotky zprávu GATE, ve kterých je obsažena informace o přiděleném časovém



Obrázek 13: Schéma multirámce ve vzestupném směru.[7]

intervalu v multirámcí pro danou ONU. ONU následně tento interval využije k zaslání odpovědi REPORT a k ní připojí i část uživatelských dat. Ve zprávě REPORT, ONU informuje OLT jednotku o velikosti dat čekající na odeslání. Podle této informace OLT přerozdělí přenosovou kapacitu v dalším cyklu. [7]



Obrázek 14: Schéma výměny zpráv v jednom cyklu.[7]

Systém zasílání zpráv mezi OLT a ONU je možno uskutečnit pomocí tří různých variant.

- V první variantě zasílá OLT pouze jednu zprávu GATE a čeká až ONU odpoví zprávou REPORT. Jakmile OLT obdrží zpětnou zprávu od ONU, ihned odesílá zprávu GATE další ONU jednotce a opět čeká. Tento způsob zaručuje naprosto bezkolizní přenos a každá ONU má pevně vyhrazenou přenosovou kapacitu. Na druhé straně při čekání na odpovědi dochází k prodávám, během kterých není využita přenosová kapacita.
- Druhý možný způsob je znázorněn na obrázku č. 14. OLT vyšle za sebou zprávy GATE (G1, G2, G3). Každá zpráva směřuje k jiné ONU jednotce. Ta poté odpovídá zprávou

REPORT (R1, R2, R3) spolu s uživatelskými daty v definovaném časovém okamžiku. K výhodám zcela určitě patří efektivnější využití přenosové kapacity a zaručení určené minimální přenosové kapacity.

- Třetí schéma pro výměnu zpráv doplňuje druhý způsob o další interval. Jedná se o ochranný interval nacházející se na konci každého cyklu. V případě vztaženém na obrázek č. 14, by se interval nacházel za zprávou REPORT od ONU 3 (R3). [7]

Součástí protokolu MPCP jsou i zprávy určené pro přidávání nové koncové jednotky ONU do optické sítě. Celý proces se nazývá ONU discover. ONU jednotku je možno přidat dvěma způsoby.

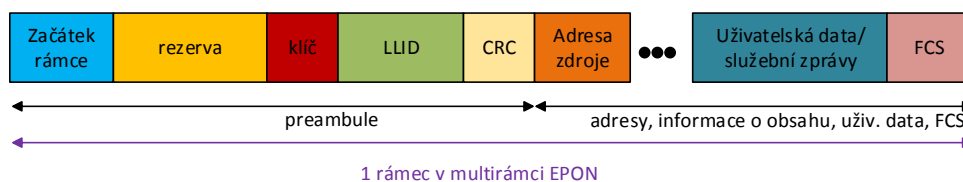
1. Ručně - je potřeba ručně zaregistrovat ONU jednotku v systému OLT, kde je nutno zadat sériové číslo koncové jednotky a přiřadit identifikační číslo ONU - ID.
2. Automaticky - automatickou detekci koncové jednotky lze spustit třemi způsoby. Prvním z nich je automatická detekce vyvolaná ručně. U další možnosti OLT periodicky vysílá v určitých časových intervalech inicializační sekvenci, na kterou nová ONU jednotka odpovídá. Třetí poslední možnost nastává, jestliže bude vyjmuta zaregistrovaná ONU jednotka ze sítě a v tom případě se začne OLT periodicky dotazovat, zda ONU nebyla připojena zpět do sítě.

Zavedení a registrace ONU jednotky do sítě probíhá následovně. Nově připojená ONU jednotka do sítě nastaví svůj vysílací výkon na standardní hodnotu. Tento vysílací výkon je upraven na základě informace v záhlaví rámce vyslaného jednotkou OLT. Poté ONU reaguje na výzvu OLT zasláním sériového čísla. Tyto výzvy se periodicky opakují a vztahují na všechny ONU jednotky v síti. OLT jednotka dále přiřadí identifikační číslo koncové jednotce (ONU-ID). Následuje proces Ranging, během kterého OLT vysílá danou sekvenci, která je zaslaná ONU jednotkou zpět. Pomocí těchto informací je určena celková doba zpoždění a fázový posuv. Výsledek měření je zaslán dané ONU jednotce, která výsledek využije k nastavení vlastních vysílacích obvodů. Na závěr dochází k nastavení vhodného vysílacího výkonu. [9][7]

3.3.3 Obsah rámce EPON

Z názvu Ethernet Passive Optical Network (EPON) vyplývá, že celá síť využívá na spojové vrstvě standard Ethernet (IEEE 802.3), tudíž skladba rámce pro přenos uživatelských nebo řídicích zpráv je podobná jako u klasické verze Ethernetu. Každý Ethernetový rámec se skládá z preamble (8 bajtů), zdrojové a cílové MAC adresy, informace o typu a délce přenášeného obsahu, vlastní obsah (uživatelská data či řídicí zprávy) a ze zabezpečovacího pole sloužící pro zjištění chyb. Ethernetový rámec není zcela totožný jako u standardu EPON. Rozdíl se týká jen preamble, kde u klasického Ethernetu je prvních 7 bajtů využito pro snadné rozpoznání začátku rámce a poslední 8. bajt (SFD) indikuje konec preamble. U standardu EPON je preamble složena z části signalizující začátek rámce (1 bajt), šifrovací klíč (1 bajt), identifikátor LLID

(Logical Link ID – 2 bajty), zabezpečovací pole preamble CRC (1 bajt) a rezervní bajty (3 bajty). [7]



Obrázek 15: EPON rámec.[7]

3.3.4 Zabezpečení dat

Data poslaná v sestupném směru je nutno zabezpečit proti odposlouchávání, jelikož každý multirámec, který je přeposlán rozbočovačem do všech ONU jednotek, obsahuje data i od jiných uživatelů. Ve směru vzestupném odposlouchávání nehrozí, neboť by muselo útočníkem dojít k přímému narušení struktury sítě, což by obsluha byla schopna zaznamenat. K zabezpečení je využito symetrické šifrování AES (Advanced Encryption Standart). Jedná se o šifru, která rozděluje data do 128 bitových bloků, které následně šifruje platným klíčem. Klíč je vygenerován ONU jednotkou až na žádost OLT. Jakmile je klíč vygenerován (většinou 128 bitů), dochází k jeho uložení do registru na ONU jednotce a k přeposlání k OLT. Po bezchybném obdržení klíče OLT jednotka náhodně zvolí počet rámců, pro které bude platit nově vygenerovaný klíč. Od této chvíle jsou šifrována jen uživatelská data v sestupném směru. Záhloví rámců nepodléhají šifrování a taktéž ani uživatelská data ve vzestupném směru. Jakmile bude vyčerpán limit rámců, pošle OLT novou žádost na vygenerování klíče a celý proces se opakuje.[7] [9]

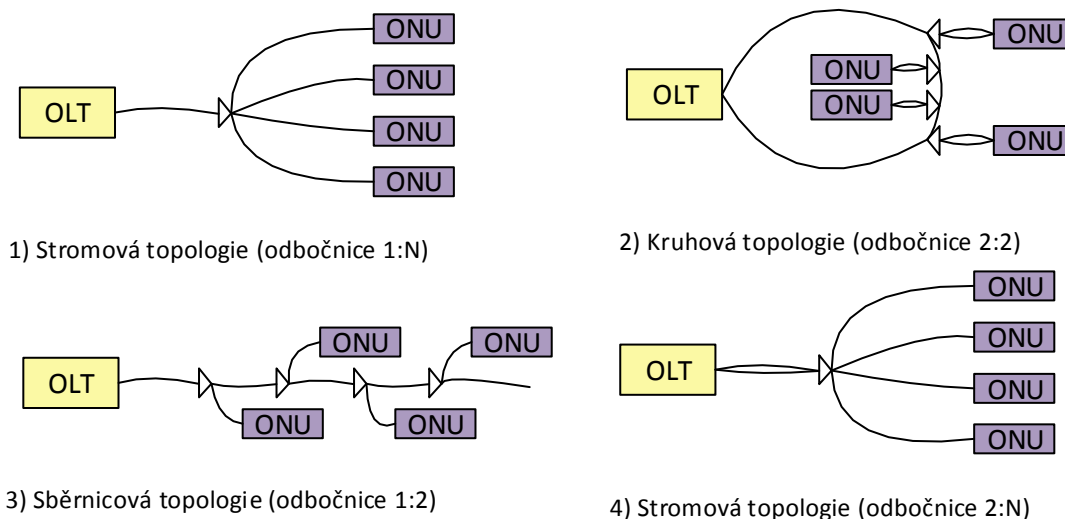
3.4 10GEAPON

Pro požadavky na přenosovou rychlost vznikl v roce 2009 nový standard 10GEAPON (IEEE 802.3av), který byl založen na standardu EPON a také na přenosu Ethernetových rámců. Z názvu vyplývá, že nový standard dosahoval maximálně 10 Gbit/s přenosové rychlosti. V symetrické variantě je možno dosáhnout přenosové rychlosti 10 Gbit/s v obou směrech. Asymetrická varianta se vyznačuje sníženou přenosovou rychlostí na 1 Gbit/s ve vzestupném směru. Ve směru k uživateli je maximální přenosová rychlost 10 Gbit/s. Oproti EPON došlo k poklesu přidáných nadbytečných dat, jelikož se využíval rozdílný kódovací princip. Původně se kódovalo 8 bitů do 10 bitů a nyní 64 do 66 bitů. To vedlo ke snížení režie kódu z 20 % na 3%. Novinkou také bylo povinné využití opravného kódování FEC (Forward Error Correction) pomocí Reed-Solomonova kódu s větší zabezpečovací částí oproti EPON, kde bylo využití FEC nepovinné. Nově došlo i ke změně využívaných vlnových délek a to z důvodu zaručení kompatibility s EPON. Nově zvolené vlnové délky umožňují na optické distribuční síti (ODN) využívat zároveň EPON i 10GEAPON. V sestupném směru se stanovilo pásmo 1575-1580 nm (EPON 1480-1500 nm). Ve směru sestupném

je možné se setkat s dvěma využívanými pásmy, které závisí na využívané variantě přenosových rychlostí. U symetrické varianty se jedná o pásmo 1260-1280 nm a u asymetrické varianty 1260-1360 nm. Jelikož obě pásma zasahují do pásma využívaného v EPON ve vzestupném směru (1260-1360 nm), je vzestupný směr EPON a 10GEPON oddělen pomocí časového multiplexu (TDM) v rámci koexistence na totožné ODN. [7][12]

3.5 Topologie PON sítí

Sdílení přenosové cesty mezi více zákazníků je velice efektivní hlavně z finančního hlediska, což je velice výhodné pro obě strany (poskytovatele a uživatele). Poskytovatel služeb utratí jen minimální náklady na připojení uživatele, který na základě toho bude mít menší poplatky za poskytované služby. Ke sdílení přenosové kapacity je využito pasivních odbočnic s různými dělicími poměry v závislosti na topologii optické distribuční sítě. Zvolením vhodné topologie je možno docílit snížení spotřeby optického vlákna v ODN a také odpadá potřeba využít aktivní prvky v přenosové cestě. Nejčastěji je využívána stromová struktura, která využívá odbočnice 1:N nebo 2:N. V případě odbočnice 2:N, jsou využita od OLT celkem 2 vlákna, kde je jedno vlákno určeno pro data a druhé pro video signál. Nesmíme zapomenout, že čím více dochází k dělicímu efektu, tak dochází i ke ztrátě výkonu ve vlákne. V případě sběrníkové topologie je signál na cestě k nejvzdálenější ONU jednotce daleko více zhoršen oproti nejbližší ONU, jelikož signál je tlumen větším počtem odbočnic. Výhodu lze spatřit v menší spotřebě optického vlákna ve srovnání se stromovou topologií. Důležitým faktorem je i využitý standard, který definuje, do jaké vzdálenosti je možné využít danou topologii s určitým dělicím poměrem. [5]



Obrázek 16: Topologie PON sítí.[5]

4 Síť nové generace - NGN/NGA

4.1 Next Generation Network - NGN

Před příchodem NGN jsme znali jen dva typy telekomunikačních sítí, které se se vyvíjely nezávisle na sobě a každá síť měla svůj vlastní směr.

První z nich je telefonní síť pro přenos hovorů. Telefonní sítě obecně označujeme pod zkratkou PSTN neboli Public Switched Telephone Network a nyní je telefonní síť plně digitalizována, kterou označujeme ISDN (Integrated Services Digital Network). Hlavní princip této sítě spočívá ve spojování okruhů. Při přenosu hovorového signálu se využívá ta samá přenosová cesta, která je rezervovaná po celou dobu spojení. Dále využívá časové dělení (TDM), kde uživatelské kanály jsou časově odděleny. V současné době telefonní sítě zvládají kromě přenosu hovorů i přenos textu, obrazu, videa a dat. Nevýhodou těchto sítí je vytvořené spojení, které je udržováno po celou dobu trvání hovoru. Během spojení se může přenášet zbytečný obsah, když například uživatel nemluví. Tím se zbytečně využívá sestavený kanál a je blokován onen kanál pro ostatní uživatele. Naopak výhodou lze spatřit ve spolehlivosti přenosu dané informace. Při vybudování kanálu pro dané spojení je zaručena průchodnost.

Na druhé straně datové sítě vznikly pro účel elektronického přenosu dat. Na začátku se jednalo o lokální sítě, které byly propojeny přes telefonní síť pomocí modemů. Následný vývoj nabral na rychlosti a došlo k přímému propojení menších sítí v rámci celosvětové sítě pro přenos dat (internet). Data jsou zde přenášeny ve formě paketů, které obsahují přijímaná nebo odeslaná data. Každý paket může mít rozdílnou přenosovou cestu, i když má paket stále stejnou cílovou adresu. Na rozdíl od telefonních sítí je zde efektivněji využito přenosových cest díky paketovému přenosu a to tak, že se zbytečně nevyužívá přenosové médium a je volné pro další účastníky. Při využití přenosu pomocí paketů nemusí vždy informace dorazit k správnému cíli.

V jednoduchosti NGN je telekomunikační síť nové generace, která ve své hlavní podstatě propojuje telefonní a datové sítě do jednoho fungujícího celku. Využívá výhod obou sítí. NGN síť se vyznačuje paketovým přenosem pro poskytování telekomunikačních služeb (telefonní, textový, obrazový, audio, video, datový přenos).

Podle definice ITU-T se jedná o vysokorychlostní paketovou síť neboli síť s velkou propustností založenou většinou na IP protokolu, který je využit v páteřní i v přístupové síti. NGN garantuje kvalitu služeb QoS. Všechny poskytované služby jsou nezávislé na přenosové technologii. Umožňuje volný pohyb zákazníka v síti, což zajišťuje nepřetržitý přístup ke službám a jejich následné využití. [1]

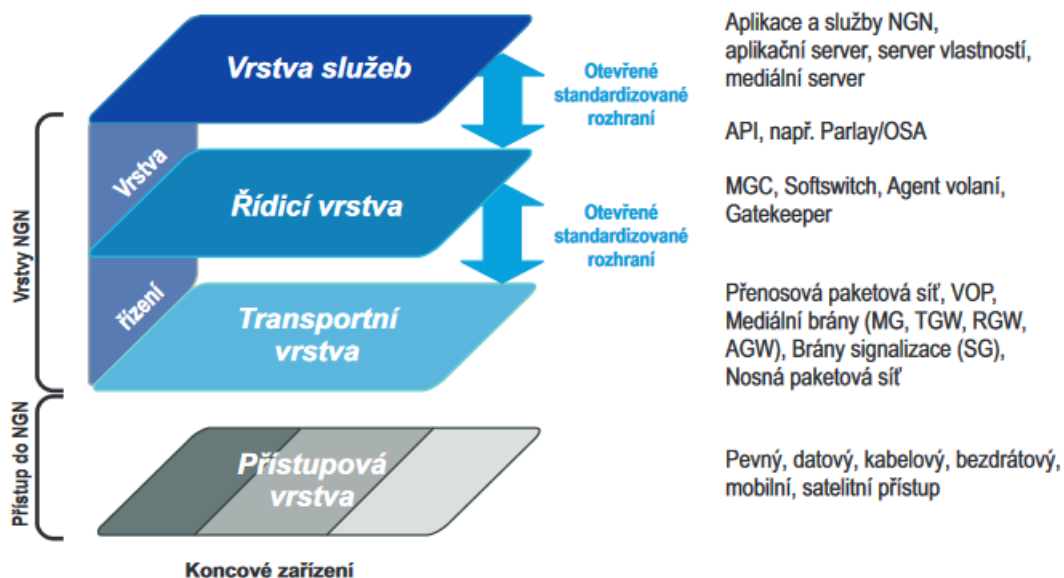
4.2 Konceptní model NGN

Konceptní model se skládá z funkčních rovin (vrstev). Každá vrstva má svou specifickou funkci v NGN síti. Tyto vrstvy jsou na sobě nezávislé a dělíme je na:



Obrázek 17: Konvergence sítí do NGN.[5]

- Přístupová vrstva - slouží pro přístup do NGN sítě. Jedná se o přístupovou síť mezi zákazníkem a transportní sítí, která je tvořena různým přenosovým médiem (drátové, bezdrátové sítě). Pro přístup lze uplatnit základní přístupové sítě nebo síť typu NGA (Next Generation Acces).
- Transportní vrstva - slouží k přenosu uživatelských dat, signalizace mezi uzly sítě, které jsou spojeny s přístupovou sítí.
- Řídící vrstva - představuje v NGN řídicí logiku pro ovládání síťových prvků zajišťující sestavování, řízení a ukončení spojení.
- Vrstva služeb - zahrnuje služby nabízené poskytovateli. [2]



Obrázek 18: Vrstvy koncepčního modelu NGN.[2]

4.3 Architektura NGN

Architekturu NGN sítí lze rozdělit do tří oblastí. První oblast je tvořena aplikačními servery zajišťující služby. Tahle část je připojena k IP páteřní síti a je často nazývána jako IP Multimedia

Subsystem (IMS). Další důležitou částí je oblast řízení, která je tvořena vhodně rozmístěnými servery nazývané softswitche. Poslední nedílnou součástí je přenosová část využívající IP protokol. Architektura NGN sítě obsahuje navíc ještě brány zajišťující spolupráci mezi dvěma rozdílnými sítěmi, respektive mezi telefonní a ip sítí. Brána je prvek či zařízení v síti, které slouží k převodu informace z paketové oblasti (IP) do oblasti časového dělení (TDM) a naopak. Existují brány pro převod uživatelských dat (nazýváme MGW-Media Gateway) a pro převod řídicích informací neboli signalizace (nazýváme SGW-Signaling Gateway) na formát vyžadovanou jinou sítí, tudíž rozlišujeme dva typy. SGW brány převádějí signalizaci SIP, H.323, MGCP, H.248/MEGACO (paketová síť) na signalizaci SS7, která je využívána v sítích s časovým dělením. Pro řízení těchto dvou typů bran se využívá prvku zvaného Media Gateway Controlle (MGC), někdy nazýván Softswitch. MGC zajišťuje následující funkce [1]:

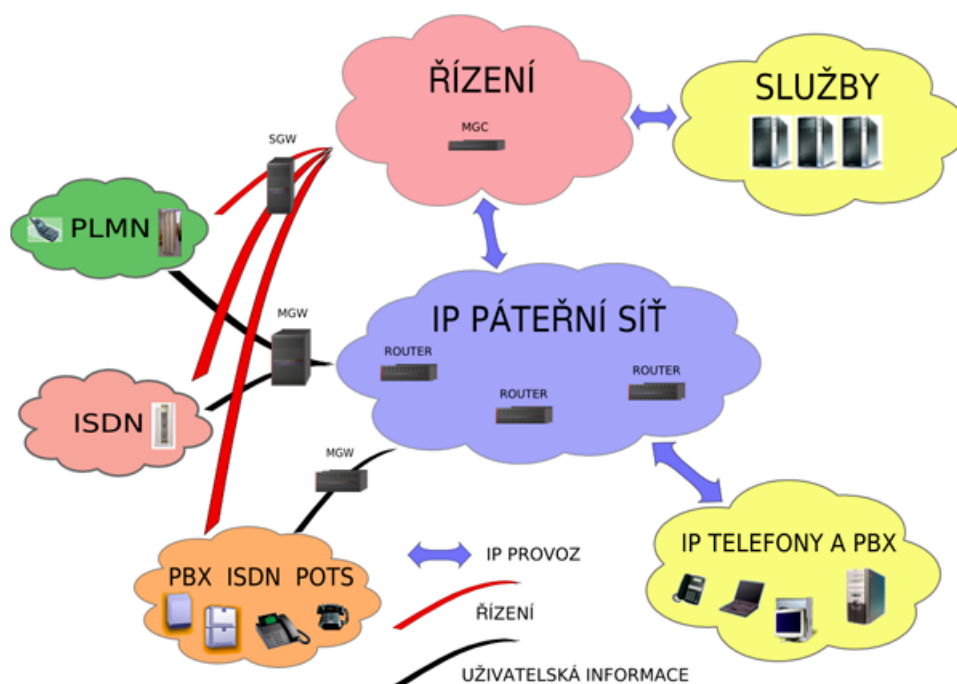
- řízení volání,
- komunikace s MGW a SGW,
- alokace zdrojů v síti,
- autentizace a autorizace,
- směrování,
- generování CDR (Call Detail Record)-záznam o spojení. [2]

NGN je výhodou pro poskytovatele, ale i pro zákazníky. Zavedení služeb do NGN sítě je jednodušší a celkově se snižují náklady na poskytovatele a tím se stávají poskytované služby levnější pro zákazníky. Různé typy těchto služeb může zákazník využívat pomocí jediného inteligentního koncového zařízení a nemusí mít pro každý typ služby jiné zařízení.

4.4 NGA-New Generation Acces

NGA přístupové sítě nové generace tvoří přístupovou část NGN sítě. NGA vyžadují flexibilní nasazení, velkou kapacitu, snadnou modernizaci, která bude sloužit více uživatelům i na delší vzdálenosti. NGA sítě musí zvládat poskytování rozmanitých širokopásmových služeb a usnadnit integraci různých technologií. NGA by navíc měla snižovat náklady na stávající služby a sloužit jako backhaul bezdrátových přístupových sítí. Přístupové sítě nové generace NGA definovala Evropská komise (20.9.2010) následovně:

"Přístupovými sítěmi nové generace (NGA)"kabelové přístupové sítě, které sestávají zcela nebo jen zčásti z optických prvků a které jsou schopné dodávat služby širokopásmového přístupu s dokonalejšími vlastnostmi (např. s vyšší propustností vyšší propustnost) ve srovnání se službami poskytovanými prostřednictvím stávajících sítí založených na kovovém vedení. Ve většině případu



Obrázek 19: Jednoduchý koncept architektury NGN sítě.[1]

jsou NGA výsledkem modernizace již existujících přístupových sítí používající kovové nebo koaxiální vedení. [40]

Na základě této definice lze chápat NGA tak, že žádná část přístupové sítě (NGA) nesmí být bezdrátová, ale jen drátová. Jelikož hlavním stavebním prvkem je optické vlákno, tak architektura NGA sítě bude mít podobu FTTH nebo FTTC/N.

Později došlo ke změnám, když v roce 2014 vydala Evropská komise novou definici (NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) č. 651/2014):

"přístupovými sítěmi nové generace (sítěmi NGA)" se rozumí vyspělé sítě, které mají alespoň tyto vlastnosti: a) spolehlivé poskytování služeb při současném zajištění velmi vysoké rychlosti na účastníka – pomocí páteřní sítě z optických vláken (nebo rovnocenné technologie) a v dostatečné blízkosti prostor uživatele tak, aby se zajistilo skutečné vysokorychlostní připojení; b) podpora nejrozumnějších vyspělých digitálních služeb včetně konvergovaných služeb spočívajících plně na technologii IP a c) podstatně vyšší rychlost uploadu (ve srovnání se základními širokopásmovými sítěmi). V současném stadiu vývoje trhu a technologií jsou sítěmi NGA: a) přístupové sítě z optických vláken (FTTx), b) vyspělé modernizované kabelové sítě a c) některé vyspělé bezdrátové přístupové sítě, díky kterým lze účastníkovi poskytnout spolehlivé vysokorychlostní připojení;" [41]

Tabulka 3: Definované hodnoty parametrů pro stabilní provoz dle MEF 23.1 - Performance Tier 1 Low, Medium.[44]

	<u>MEF 23.1 - Performance Tier 1</u>	
<u>Parametr</u>	<u>Low</u>	<u>Medium</u>
Zpoždění	≤ 37 ms	≤ 20 ms
Variace zpoždění	Není definována	≤ 8 ms
Ztrátovost paketů	$\leq 10^{-3}$	$\leq 10^{-4}$
Dostupnost	Není definována	Není definována

NGA architektury jsou výhradně založené na vláknech (FTTx) a jsou tedy nejčastějším předmětem financování při budování NGA sítí. V souladu s Pokyny EU a dokumentem Digitální česko 2.0 je považována přenosová rychlost NGA 30 Mbit/s (reálná) za minimální v sestupném směru. NGA sítě dosahují takových rychlostí, aby odpovídaly schopnostem jádra NGN sítě nové generace. Součástí NGA sítě je páteřní propojení (backhaul), které je spojeno s páteřní sítí NGN. Backhaul lze chápat jako mezičlánek mezi přístupovou a páteřní sítí. Co se týče výstavby NGA sítí, je velmi důležitá přítomnost páteřní optické sítě, na kterou se NGA napojuje. [43][42].

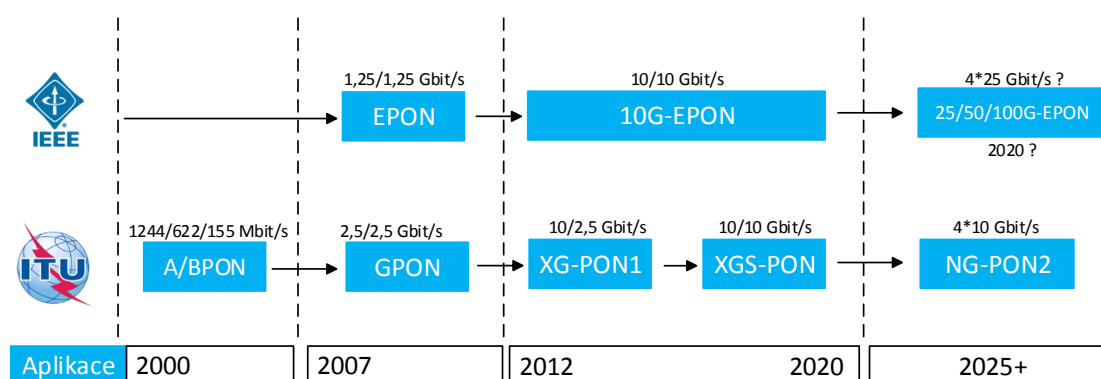
Podmínkou pro nově budované NGA sítě je schopnost poskytnout průměrnou přenosovou rychlost 100 Mbit/s v sestupném směru a 33 Mbit/s ve vzestupném směru a to v současné době nebo do roku 2020. Do této doby, respektive do roku 2020 musí průměrná přenosová rychlost dosahovat alespoň 30 Mbit/s v sestupném směru a 10 Mbit/s ve vzestupném směru. Pasivní infrastruktura musí být schopna dosáhnout takové přenosové kapacity, že při budoucí výměně aktivních prvků sítě (do roku 2020) bude schopna poskytnout průměrnou rychlost 100 Mbit/s v sestupném směru a 33 Mbit/s ve vzestupném směru. V rámci dokumentu "Metodika pro měření a vyhodnocení datových parametrů pevných sítí elektronických komunikací" od ČTÚ by nově budované NGA sítě měly splňovat kritéria spojená s parametry jako je ztrátovost paketů, zpoždění a kolísání zpoždění dle standardu MEF 23.1, kategorie Performance Tier 1 Medium. Pro stávající NGA sítě by mělo platit MEF 23.1, kategorie Performance Tier 1 Low. Požadavky obou variant reflektuje tabulka č. 3.[44]

Trendem pro přístupové sítě nové generace (NGA) jsou pasivní optické sítě další generace (Next-Generation PON) s přenosovou rychlostí alespoň 10 Gbit/s. Vhodným řešením pro PON se jeví do budoucna WDM (vlnový multiplex), jelikož TDM (časový multiplex) dosáhl téměř své hranice. Níže (v další podkapitole) jsou uvedeny technologie další generace PON, které byly standardizované organizacemi ITU a IEEE.

4.5 Next Generation PON

Na vývoji další generace GPON standardu pracovala skupina FSAN (Full Service ACCESS Network) spolu s ITU-T, která připravuje specifikace pro telekomunikační systémy. FSAN a ITU-T rozdělili vývoj pasivních optických sítí do dvou fází: NG-PON1 (Next-Generation PON1) a NG-PON2 (Next-Generation PON2). Postupem doby mezi oběma generacemi PON navíc vznikla

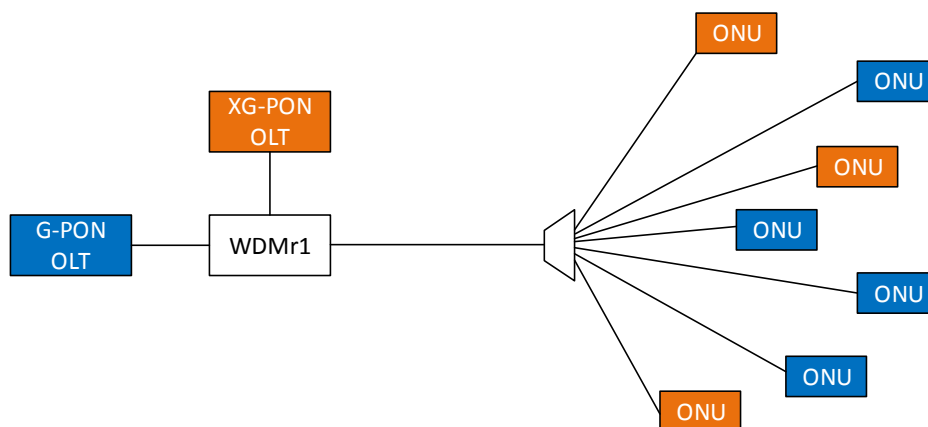
další vývojová fáze zvaná XGS-PON (2016), jelikož vývoj NG-PON2 byl dočasně pozastaven. Za NG-PON1 se považují vylepšené stávající G-PON, které se masově využívají po celém světě. Hlavním požadavkem NG-PON1 je koexistence se systémem GPON a znovu použití stejné ODN. Optická distribuční síť (ODN) zaobírá celkem 70 % investic z celkové nákladu za zavedení PON sítí. Proto je velmi zásadní ve vývoji NG-PON, aby byla kompatibilní s předchozími sítěmi PON. Při vývoji NG-PON2 se velmi diskutovalo o tom, jakou technologii využít. V úvahu byla řada možností například WDM, TWDM, OCDMA, OFDMA. Nakonec byla vybrána varianta TWDM a roku 2015 bylo NG-PON specifikované pod označením ITU-T G.989. V původním plánu FSAN předpokládalo, že pro technologii NG-PON2 bude potřeba vybudovat zcela novou ODN síť s vlnovými splittery místo výkonových splitterů. S ohledem na velké finanční investice do ODN se stala kompatibilita NG-PON2 už s nasazenou ODN sítí hlavním požadavkem. Navíc ve finálním provedení je podporován i splitter vlnových délek.[22] [24]



Obrázek 20: Evoluce pasivních optických sítí.[26]

Vývoj další generace GPON dělíme tedy do následujících 3 fází:

- **NG-PON1** - Hlavní vlastností NG-PON1 je kompatibilita se staršími ODN využívané technologií GPON, díky tomu se při nasazení NG-PON1 systému ušetří velká část finančních prostředků. FSAN definovala NG-PON1 jako asymetrický systém s rychlostí 10G v sestupném směru (downstream) a 2,5G ve směru vzestupném (upstream). Technologie NG-PON1 je v podstatě vylepšené TDM PON vycházející z GPON. Systém patříící do NG-PON1 je nazývan XG-PON1 (ITU-T G.987) a byl specifikován v roce 2010. Tento systém umožňuje využívat optickou distribuční síť (ODN) předchozí GPON zahrnující optická vlákna, rozbočovače. XG-PON1 je rozebrána již výše (viz). XG-PON využívá shodnou architekturu P2MP (point to multipoint) jako GPON a podporuje scénáře typu FTTH, FTTCell, FTTB, FTTCurb, FTTCabinet. Navíc XG-PON využívá jiné vlnové délky než GPON a tím je umožněna koexistence obou systému na stejné ODN. Na obrázku je zobrazena koexistence GPON a XG-PON1 pomocí WDM stacking.

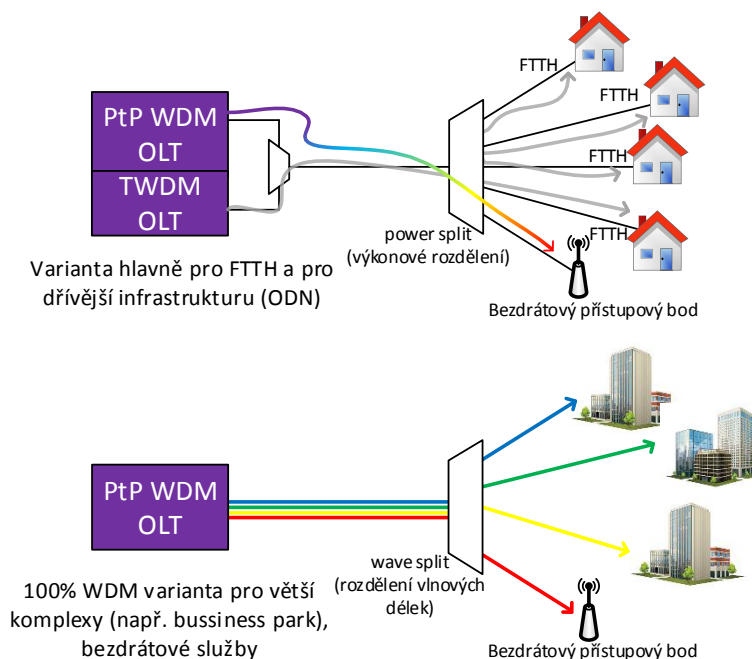


Obrázek 21: GPON a XG-PON1 koexistence pomocí WDM stacking.[22]

Při koexistenci GPON a XG-PON1 (viz obrázek č. 21), oba systémy využívají stejný optický rozbočovač. Pokud se jedná o rozbočovač 1 : 32, tak každému uživateli GPON je umožněna přenosová rychlost 80 Mbit/s v sestupném směru (downstream) a 40 Mbit/s ve vzestupném směru (upstream). Uživatel XG-PON je umožněna přenosová rychlost poměrně vyšší a to 320 Mbit/s v sestupném směru a 80 Mbit/s ve vzestupném směru. [22]

- **XGS-PON** - Roku 2016 specifikován v doporučení ITU-T G.9807.1. Celým názvem 10 Gigabit Capable Symmetric PON. XGS-PON zavádí přenosovou rychlost 10 Gbit/s v obou směrech. Kromě symetrického režimu podporuje i asymetrický režim(10/2,5 Gbit/s). XGS-PON umožňuje využívat stejné vlnové délky jako XG-PON nebo GPON. Stejně jako NG-PON1 umožňuje koexistovat se systémem GPON na stejné ODN, a tudíž chrání investice na budování ODN. Minimální dosažitelná vzdálenost musí splňovat alespoň 20 km a systém by měl podporovat splitter s dělicím poměrem 1:64. [24]
- **NG-PON2** - Technologie popsaná v sérii doporučení IT-T G.989. NG-PON2 systém může tvořit několik kanálů za současného využití časového a vlnového multiplexu (TWDM) nebo jednotlivé kanály mohou být tvořeny jen pomocí WDM multiplexu pro point-to-point komunikaci (P2P). Je i možné obě varianty využívat současně (TWDM, P2P WDM). TWDM kanály mohou pracovat v režimech 10 Gbit/s a 2,5 Gbit/s v upstreamu nebo downstreamu. U P2P WDM existují rychlosti třídy 1,25 Gbit/s, 2,5 Gbit/s a 10 Gbit/s. U NG-PON2 je možno maximálně využívat 4 vlnové délky a v budoucnosti se plánuje využít celkem 8 vlnových délek. Každá vlnová délka v rámci jednoho vlákna poskytuje symetrickou přenosovou rychlost 10 Gbit/s (upstream a downstream). Při využití 4 vlnových délek je umožněna přenosová kapacita 40 Gbit/s na jedno vlákno. Standard připouští zavedení i 8 vlnových délek. V takovém případě by celková kapacita systému dosahovala 80 Gbit/s. Jako u předešlých generací, tak i NG-PON2 podporuje koexistenci s předchozími sys-

témy NG-PON1, XGS-PON, GPON. Vzhledem k tomu, že NG-PON2 pracuje s různými vlnovými délkami, využívají se ONU jednotky s laditelným laserem, které umožňují dynamickou změnu vlnové délky při komunikaci s OLT. Z obrázku č. 23 si lze všimnout, že pro komunikaci ve směru upstream v rámci TWDM režimu jsou definované 3 pásma (široké, omezené, úzké pásmo). Při výběru upstream pásma záleží na odlišných vlastnostech ONU vysílače (laseru). Pro downstream je určené pásmo 187,1 až 187,8 THz (1603-1625 nm) specifikované pro 8 kanálů s 100 GHz mezerami mezi sebou. Vlnový plán obsahuje další dvě pásma, které jsou určeny pro kanály PtP WDM. Jedním z nich je sdílené spektrum (Shared Spectrum) pro účely koexistence se staršími PON (G-PON, XG-PON1, XGS-PON a RF Video). Druhým pásmem je rozšiřující spectrum (Expanded Spectrum), které využívá koncept spektrální flexibility v NG-PON2 a umožňuje využít právě ty vlnové délky pro PtP WDM, které nejsou využity žádným nasazeným systémem. Každý systém NG-PON2 umožňuje minimálně pracovat s 256 ONU jednotkami v rámci ODN. Zároveň systém by měl podporovat služby na vzdálenost větší než 40 km. Na obrázku č. 22 lze flexibilní možnosti nasazení systému. [21][28]



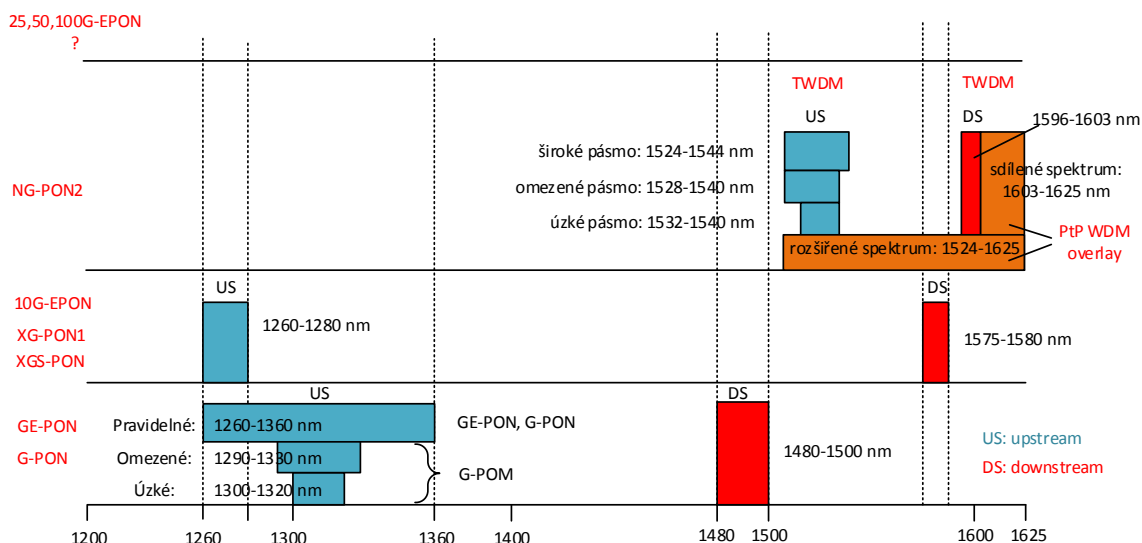
Obrázek 22: Flexibilní možnosti nasazení systému NG-PON2.[25]

Organizace IEEE, která vytvořila standard EPON (IEEE 802.3), pokračovala nadále ve vývoji dalších PON využívající Ethernet. První technologií IEEE v rámci PON sítí se stala v roce 2004 technologie EPON. V současné době se jedná o systém, který je velmi využíván.

Umožňuje přenosovou rychlost 1 Gbit/s v obou směrech (upstream a downstream). Systém EPON je podrobně popsán již výše. Roku 2009 vznikl systém 10G-EPON (IEEE 802.3av) jako standard nové generace. Jak už z názvu vypovídá, nabízel přenosovou rychlost v sestupném směru 10 Gbit/s a ve vzestupném směru 10 Gbit/s nebo 1 Gbit/s. Také podobně jako systém XG-PON, který mohl koexistovat s GPON, tak i 10GE-PON byl navržený tak, aby mohl být využíván spolu s EPON na stejné ODN síti. Jako další pokračovatel v linii EPON by měla být standardizována nová technologie. Již v roce 2015 byla vytvořena speciální skupina (IEEE P802.3ca Task Force), která se zaměřuje na standardizaci nízkorozpočtového řešení pro další generaci EPON. Cílem je standardizovat 25, 50, 100G EPON za využití kanálů o kapacitě 25 Gbit/s. Nový systém bude využívat topologie point-to-multipoint a koexistence s 10GEPON bude samozřejmostí. Systém s jedním kanálem o kapacitě 25G by měl být levnější než varianta 50G, 100G. Laditelnost vlnové délky není u systému podporována, což znamená, že všechny 25G kanály budou pracovat na vlastní vlnové délce. Z těchto důvodů nová generace EPON (IEEE 802.3ca) není považována za přímého konkurenta NG-PON2 a také i proto, že se spíše zaměřuje na jiné cíle. Skupina vyvíjející standard 802.3ca se zaměřuje na přenos s rychlostí 25 Gbit/s na vlnovou délku a na tzv. channel bonding (spojování více kanálů) k poskytnutí 50 nebo 100 Gbit/s, zatímco NG-PON2 se zaměřuje na operace s více vlnovými délkami, kde na jednu vlnovou délku připadá kapacita 10 Gbit/s. Nicméně koncept channel bonding se již využívá u kabelové technologie DOCSIS a umožňuje kombinovat dva až čtyři 25G kanály s různou vlnovou délkou za cílem zvýšení propustnosti. ONU jednotka by měla být schopna vysílat a přijímat 100G na čtyřech vlnových délkách. Spojování kanálů je důležitou funkcí pro zvyšování přenosové rychlosti nové generace PON a navíc zvyšuje i životnost sítě. Zatím se předpokládá, že channel bonding bude nabízeno pomocí generačního přístupu. Poskytnutí 50G bude k dispozici v rámci 2. generace a 100G v rámci 3. generace za využití 4 vlnových délek. Nutné je poznamenat, že konečná implementace channel bonding je stále předmětem šetření při vývoji nového systému, jehož standardizace by měla proběhnout v roce 2020. [23]

4.6 Technologie Next-Generation PON

Jak již bylo řečeno, technika TDM v PON sítích dosáhla téměř svého maxima a nahrazuje ji technika WDM, která se jeví jako velká perspektiva pro další generace PON. WDM se již využívá současně s TDM a tvoří tak hybridní síť NG-PON2 (zatím poslední generace G-PON). Spojením různých technik s WDM lze dosáhnout velmi efektivního přenosu, který může být využit při dalším návrhu další generace. WDM-PON, které tvoří významnou část pasivních optických sítí další generace, jsou probrány již výše. Kromě technologie, na které stojí NG-PON2, jsou zde probrány PON sítě využívající rozdílné technologie, které mohou při spojení s WDM tvořit další generaci PON sítí.

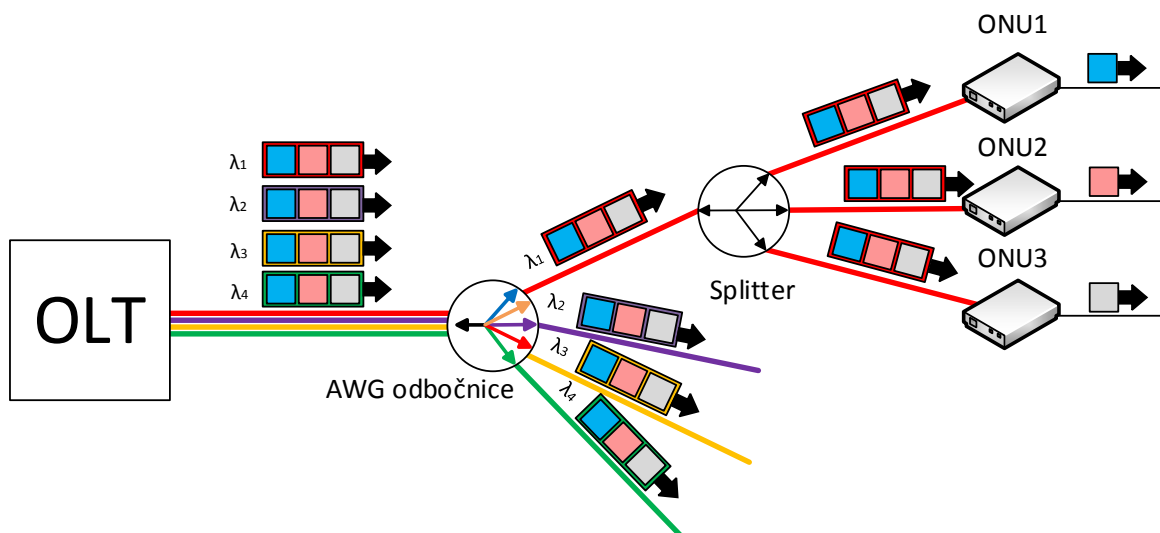


Obrázek 23: Plán vlnových délek pro PON standardy ITU-T a IEEE.[27]

4.6.1 WDM-TDM PON / Hybridní PON

WDM-TDM pasivní optická síť je považována za hybridní PON, jelikož kombinuje sdílení přístupu pomocí vlnového a časového dělení. Někdy nazývaná také jako TWDM (Time and Wavelength Division Multiplexed) PON. Pod WDM-TDM PON si lze například představit několik vzájemně nezávislých PON sítí využívající časové dělení, kde každá tato PON síť využívá svou dvojici přidělených vlnových délek (1 vzestupně + 1 sestupně) pro obousměrnou komunikaci a všechny koncové jednotky v téhle jedné PON síti využívají přístup pomocí časového dělení TDM. V případě celkového využití 16 vlnových délek CWDM (8 vzestupně + 8 sestupně) a TDM se 16 time sloty je možné celkem připojit $8 \times 16 = 128$ koncových jednotek k OLT, tedy pokud každé podsíti je přidělena dvojice vlnových délek. Při implementaci DWA (dynamické přidělování vlnových délek) a DBA (dynamické přidělování časových intervalů) lze docílit neefektivnějšího hospodaření s přenosovými prostředky, kdy ONU jednotkám mohou být přiděleny další nevyužité vlnové délky, případně jejich volné části časového intervalu. [29]

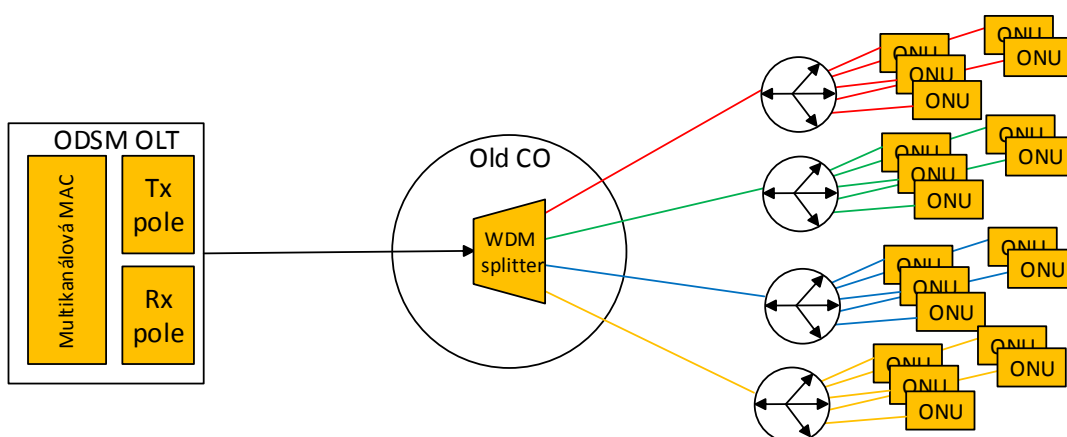
Na obrázku č. 24 je znázorněna funkce WDM-PON, kde pomocí OLT je vysíláno několik vlnových délek na vstup AWG odbočnice. Pomocí odbočnice dojde k rozdělení vlnových délek do určených směrů, kde se nacházejí jednotlivé podsítě využívající TDM. Dále je signál v podsíti výkonově rozdělen pasivním rozbočovačem do různých směrů k jednotlivým koncovým jednotkám. ONU jednotka si při příjmu signálu vybere daný time slot, který jí byl přidělen pro komunikaci s OLT. Taktéž v opačném směru komunikace využívá ONU jednotka přidělený časový interval, který se liší od ostatních ONU v rámci podsítě.



Obrázek 24: WDM-TDM PON.[29]

4.6.2 ODSM-PON

ODSM-PON (Opportunistic and dynamic spectrum management PON) umožňuje síťovým operátorům využívat potenciál nasazených sítí k poskytování lepších služeb. V síti ODSM-PON zůstává ODN síť nezměněná s výjimkou jedné změny, která je WDM splitter. Navíc je možné využívat stávající ONU jednotky v prostorách uživatele. ODSM-PON poskytuje zásadní řešení pro konsolidaci CO (Central Office) a kontroly nákladů. Koncovým uživatelům je pomocí ODSM-PON poskytnuto optické širokopásmové připojení za dostupnou cenu, neboť je možné využít stávající ODN a ONU jednotky. Tato technologie je vhodná pro průmysl.



Obrázek 25: ODSM PON.[22]

Řešení znázorněné na obrázku č. 25 bylo navrženo v roce 2010. V tomto řešení mohou být čtyři GPON/XG-PON1 OLT nasazené v "Old CO" nahrazeny jedním pasivním WDM rozbočovačem pro upgrade sítě. Sít od CO k uživatelům zůstává po upgradu nezměněná. V sestupném směru pomocí ODSM OLT jsou generovány datové toky na různých vlnových délkách šířící se v jediném optickém vlákne směrem do WDM splitteru, kde probíhá vlnové dělení a jednotlivé datové toky jsou distribuovány do ONU koncových jednotek GPON/GX-PON1. V sestupném směru je kromě vlnového dělení WDM využito i časové dělení TDM. Ve vzestupném směru je opět využito časové a vlnové dělení. Signály jednotlivých ONU jednotek jsou ve WDM splitteru kombinovány a následně přenášeny do OLT.[22]

Hlavní ODSM-PON funkce jsou následující:

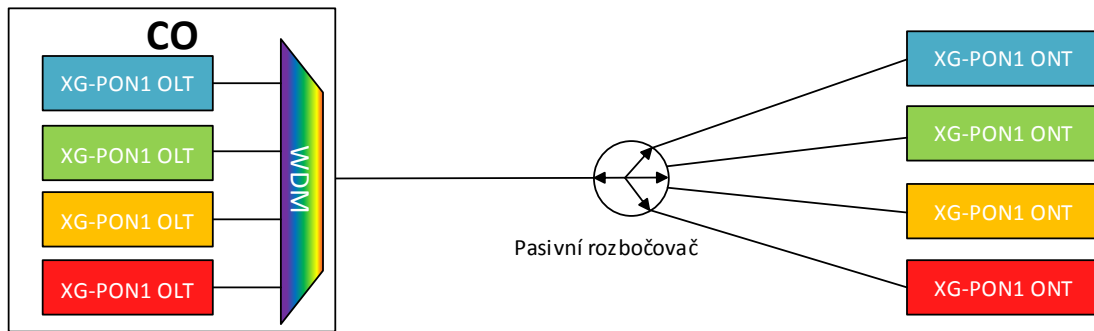
- Využívá stávající ODN (od CO až k uživateli).
- Využívá stávající ONU koncové jednotky v prostorách uživatele.
- Snižuje náklady a šetří energii pomocí pasivního "Old CO".
- Podstatně zlepšuje (asi 10x) sdílení vláken mezi CO a koncovými zařízeními.
- Splňuje zásady implementace GPON/XG-PON1, tudíž je umožněno provést upgrade na těchto sítích.

4.6.3 Stacked XG-PON

Hlavním účelem tohoto řešení je možnost multiplexování několika XG-PON1 sítí na stejném vlákne. K realizaci stacked XG-PON by bylo možné využít hrubý vlnový multiplex CWDM, který by byl levnější než ten, který je zapotřebí pro WDM-PON. Jak je možno vidět na obrázku č. 26, více XG-PON1 sítí sdílí jednu ODN pomocí vlnové multiplexu WDM. V CO (Central Office) se kromě 4x XG-PON1 OLT nachází WDM rozbočovač, který ve směru k ONT multiplexuje několik optických signálů. Ve směru k CO už WDM rozbočovač propouští jednotlivé vlnové délky nadefinovaným směrem k určitému OLT. Každá XG-PON1 síť pracuje nezávisle na rozdílné dvojici vlnových délek (1 upstream + 1 downstream). Vlnové délky mohou být přiděleny jak pevně, tak i proměnlivě. Vlnový plán je pro stacked XG-PON klíčový. Při nasazení systému stacked XG-PON by měly být nahrazeny ONU XG-PON1 za laditelné ONU jednotky. Stacked XG-PON má nejen výhodu zvýšené šířky pásma, ale nabízí také možnost pronájmu specifických vlnových délek různým operátorům stejným způsobem, jaký se dnes provádí s vlákny. [22]

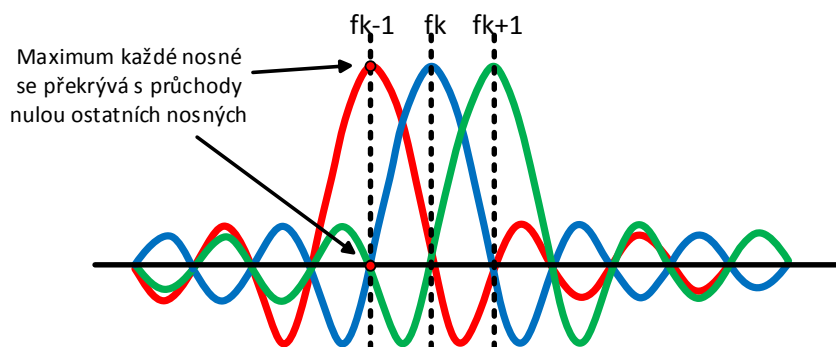
4.6.4 OFDM-PON

Jak už z názvu vypovídá, Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) PON využívá OFDM modulační schéma, které významně zvyšuje šířku pásma v přístupových sítích a navíc i celkový dosah sítě. OFDM používá několik desítek až tisíc nosných kmitočtů. Každá nosná je dále



Obrázek 26: Stacked XG-PON.[22]

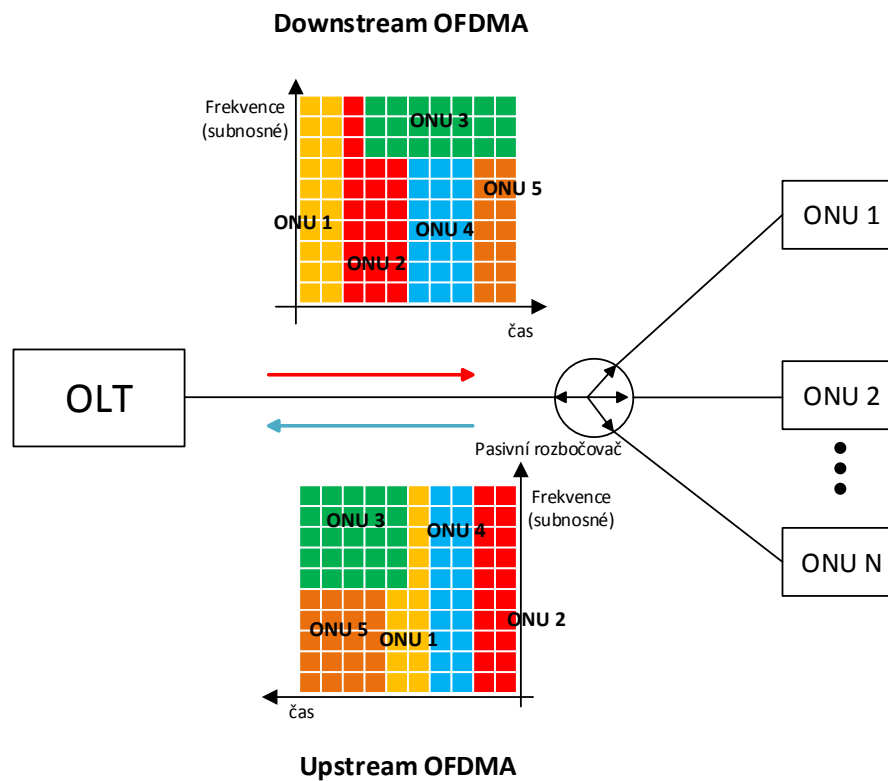
modulována pomocí modulace QPSK nebo m-QAM. Nosné kmitočty jsou vzájemně ortogonální. To znamená, že při maximu každé nosné (špička) se ostatní nosné překrývají v nule (viz obrázek č. 27).



Obrázek 27: OFDM spektrum.

Jednotlivý kanál se tak skládá ze stovek subnosných, mezi které je rozdělen datový tok. Každá subnosná je přenášena nízkou modulační rychlostí, díky tomu se OFDM stává odolná proti vícecestnému (multipath) šíření v bezdrátových sítích. V optických komunikacích má chromatická disperze a polarizační vidová disperze podobné účinky jako vícecestné šíření. OFDM využívá vkládání ochranného intervalu. Jedná se o časový interval, kdy není vysílána žádná nová informace. Pomocí tohoto ochranného intervalu se OFDM stává vysoce odolná proti interferencím mezi symboly ISI (Inter Symbol Interference) a nosnými ICI (Inter Carrier Interference), což umožňuje přijímací straně nerušeně přijmout právě vysílaný symbol. OFDM je už úspěšně využíván v ADSL, DVB-T, WLAN a WiMAX technologiích.[34] [35]

OFDM PON využívá OFDM Acces (OFDMA) a je v podstatě hybridní technologií kombinující OFDM a Time Division Multiple Acces (TDMA). Jednotlivé subnosné jsou děleny do skupin (subkanálů) a každá skupina obsahuje specifická data pro danou ONU jednotku. ONU jednotka



Obrázek 28: Architektura OFDM-PON sítě. [36]

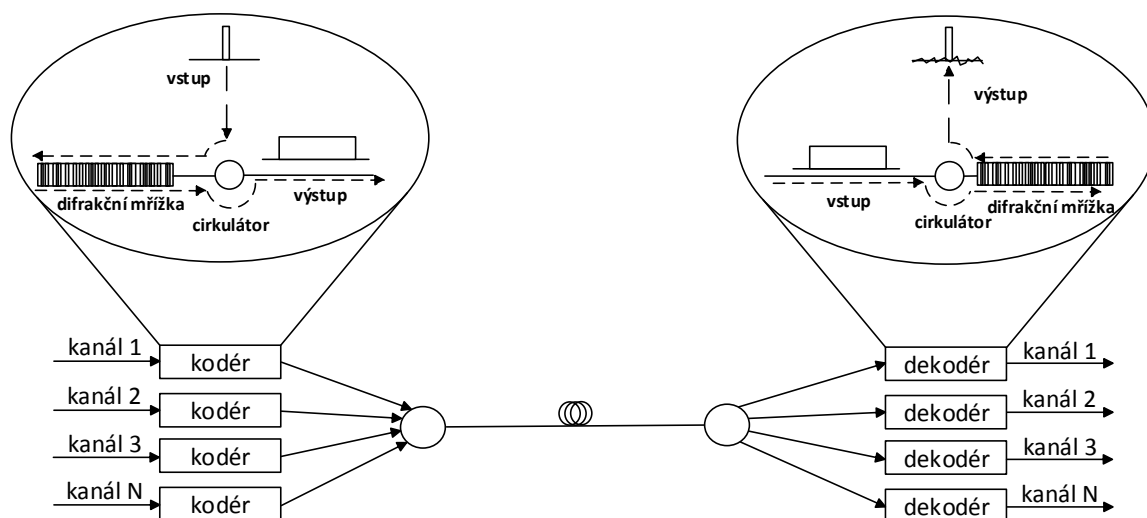
obdří od OLT signál obsahující všechny skupiny, jelikož signál prochází pasivním rozbočovačem. Poté ONU jednotkou je vybrána specifická skupina se specifickými daty. Subnosné mohou být k ONU dynamicky přiřazovány a jejich počet se může v jednotlivých časových intervalech měnit. To vše záleží na specifických požadavcích každého uživatele.

Pro realizaci OFDM PON jsou využity levnější elektronické zařízení místo nákladných optických zařízení. Pomocí OFDM v PON sítích je možné zvýšit dosah sítě až přes hranici 100 km a to bez použití žádných speciálních vláken, optických zesilovačů či drahých laserů. Pro zvýšení přenosového pásma lze OFDM PON kombinovat s technologií WDM. [36] [35]

4.6.5 CDMA-PON

Technologii vícenásobného přístupu s kódovým dělením CDMA (Code-division multiple access) lze také aplikovat v PON sítích. Mezi výhody CDMA PON lze řadit možnost ONU jednotky využívat rozdílné přenosové rychlosti a také ochranu proti neautorizovaným uživatelům. Optické CDMA lze využít také ve spojení s technologií WDM pro zvýšení kapacity šířky pásma. CDMA umožňuje přenést více uživatelských signálů prostřednictvím jediného kanálu. Bity (symboly) z jednotlivých signálů jsou zakódovány způsobem, který je rozpoznatelný jen dekodérem. V bezdrátových systémech je využívána technika FH-CDMA (Frequency Hopping) spočívající v

náhodném přeskokování mezi nosnými frekvencemi. Další typ CDMA využívá techniku přímého rozprostřeného spektra DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) a označujeme jej jako DS-CDMA. Pomocí DSSS je každý bit (1 a 0) uživatelského signálu zakódován do delšího řetězce bitů, přičemž každý uživatel využívá pro bity rozdílné hodnoty řetězce. Signál je poté rozprostřen do větší části spektra. Prozatím se technika DSSS jeví jako vhodná pro optické CDMA. Optické DS-CDMA může být implementováno pomocí pasivních difrakčních filtrů. Například lze využít Braggovu difrakční mřížku. Jak je znázorněno na obrázku, kodér a dekodér mohou využívat stejnou základní implementaci. Signál je naveden na jeden konec filtru, kterým se poté šíří a vlivem mřížky dochází k odrazům světla vytvářející interferenci, proto výsledný signál, odrážející se zpět z filtru, je změněn v amplitudě i ve fázi, přičemž je symbol rozšířen v čase. U kodéru je vstupní symbol převeden na symbol rozšířeného spektra. Na přijímací straně se provádí inverzní postup, který převede symbol rozprostřeného spektra zpět do originální podoby.



Obrázek 29: CDMA-PON. [37]

Ve směru upstream každá CDMA-PON ONU jednotka využívá unikátní vzor mřížky pro zakódování vysílaných symbolů. Vzhledem k linearitě Braggova filtru je šířka pásma rozloženého spektra úměrná počtu ONU. OLT přijatý signál rozděluje do více difrakčních filtrů, aby získal data od různých ONU jednotek. Při klasické implementaci optického CDMA (OCDMA) používá vysílač a přijímač identické Braggovy mřížky. Složitější přijímače umožňují využívat i rozdílné difrakční mřížky na vysílači a přijímači. Pro správnou funkci CDMA PON je velmi důležitá teplotní stabilita. Při nedodržení teplotní stability dochází ke změně vlastností mřížky. Na druhou stranu lasery využívané v OCDMA systému nevyžadují stabilitu kmitočtu. Jedním z hlavních nedostatků je, že dochází ke vzniku poměrně velkého útlumu vlivem splitteru, cirkulátoru a filtru. Důsledkem toho je nízký rozdělovací poměr v rozmezí 1:2 až 1:8. [37]

5 Přístupové technologie xDSL

Přenosové systémy DSL (Digital Subscriber Line - digitální účastnická linka) slouží pro vysokorychlostní přenos dat po již existujícím metalickém vedení (telefonní vedení), které sloužilo pro přenos analogového telefonního signálu. Technologie DSL se řadí do skupiny přístupových sítí, jejichž rozvody vedou až k samotným uživatelům. V současnosti se jedná o nejpoužívanější metodu připojení k internetu. K přenosu je zde využito přeložené pásmo nebo základní pásmo. V případě využití přeloženého pásma, je analogové telefonní pásmo (frekvence pod 4 kHz) nebo pásmo určené pro ISDN frekvenčně odděleno (FDD) od pásma pro přenos dat, které se nachází na vyšších frekvencích. Takže pomocí FDD je možno realizovat přenos dat a telefonního signálu dohromady. V druhém případě není možné přenášet telefonní signál a data současně na jedné lince, jelikož pro přenos dat je využito analogové telefonní pásmo či ISDN pásmo. Velmi důležitým a zároveň základním prvkem pro komunikaci pomocí telefonního vedení je modem, který sdružuje funkci modulátoru a demodulátoru. Z finančního hlediska je to nenáročná varianta, jelikož ve většině případů není nutno budovat přenosovou trasu a tím jsou náklady menší. Pomocí této technologie je možno dosáhnout přenosové rychlosti několika desítek Mbit/s. Existuje více variant technologie xDSL, které se liší v typu modulace, přenosové rychlosti, využitém frekvenčním pásmu a maximální překlenuté vzdálenosti. Digitální účastnické linky lze rozdělit podle symetrie přenosových rychlostí v obou směrech:

- Symetrické rychlosti - IDSL, HDSL, SDSL, SHDSL, VDSL
- Asymetrické rychlosti - ADSL, VDSL

Dále rozlišujeme DSL systémy na základě použitého pásma pro přenos:

- Základní pásmo - IDSL, HDSL, SDSL, SHDSL
- Přechodové pásmo - ADSL, VDSL

DSL technologie takřka vytlačila technologii ISDN, která se využívala pro hlasovou a datovou komunikaci na telefonním vedení. Pro přenos u ISDN se využívaly 3 kanály. Přesněji dva digitální kanály (B kanály) s rychlostí 64 kbit/s (celkem 128 kbit/s), které byly využity k telefonování nebo připojení k internetu a třetí kanál (D kanál) určený pro signalizaci s rychlostí 16 kbit/s. Celkový přenos dosahoval rychlosti 160 kbit/s (144 kbit/s + režijní bity). Pro požadavky internetu byl přenos dat pomocí technologie ISDN nedostačující.[3]

5.1 IDSL

IDSL se stala prvním zástupcem ze široké rodiny DSL. Samotná technologie funguje nad ISDN, proto IDSL (ISDN Digital Subscriber Line). Rozdíl mezi technologiemi spočívá v přímém permanentním připojení IDSL na datovou síť na rozdíl od ISDN, kde až po zadání čísla poskytovatele

Tabulka 4: Porovnání HDSL na 1,2 a 3 párů. [3]

Počet párů	Celková rychlost [kbit/s]	Rychlost na 1 pár [kbit/s]	služební kanál [kbit/s]	A [dB] (150 kHz)
1	2304	2304	16	24
2	2304	1152	16	27
3	2304	768	16	31

byl zřízen dočasný komunikační spoj. V jednoduchosti lze říci, že se velice podobá ISDN, ale IDSL je určena jen pro data. Pro přenos dat je zde pro uživatele dostupná přenosová rychlost v symetrickém provozu 160 kbit/s v obou směrech, ale užitečná rychlost je jen 128 kbit/s. IDSL využívá pro přenos stejného linkového kódu 2B1Q jako ISDN. Komunikace je realizována v základním pásmu a tudíž není možné současně provozovat hlasové služby. Na běžném vedení je možné dosáhnout 10 až 12 km překlenutelné vzdálenosti. Pro připojení k technologii je potřeba IDSL modem využívající jeden pár vodičů s rozhraním ISDN BRI. [3]

5.2 HDSL

HDSL (Hight bit rate Subscriber Line) je symetrická širokopásmová přenosová technologie popsaná v doporučení ITU-T G.991.1. HDSL umožňuje maximální přenosovou rychlost E1 2048 kbit/s (Evropa) nebo T1 1,544 kbit/s (USA) při využití jednoho, dvou nebo tří symetrických párů. Systémy s třemi páry dosahují větší překlenutelné vzdálenosti. Technologie poskytuje duplexní přenos, který je zde zajištěn pomocí metody potlačování ozvěn EC (Echo Cancellation). Dosah HDSL se většinou pohybuje od 2,7 až do 3,6 km. Při použití většího průměru jádra lze dosáhnout i vzdálenosti 6 km bez opakovaců. K přenosu bitů je možné využít dvou metod. První metoda využívá linkový kód 2B1Q, při kterém není možné během přenosu dat, souběžně využívat ISDN, nebo frekvenční pásmo využívající PSTN. Kdežto druhá metoda využívající modulaci CAP je schopná na stejném symetrickém páru souběžně přenášet data i hlas (ISDN, PSTN). Pomocí modulace CAP se dosahuje i většího překlenutelného útlumu, což umožňuje využití i jediného symetrického páru. I když druhá metoda umožňuje současně přenášet data i hlas, je v Evropě využívanější metoda s linkovým kódem. V následující tabulce se nachází přenosové rychlosti jednotlivých párů v závislosti na počtu využitých párů při přenosu a útlumu, který je možno překlenout při referenčním kmitočtu 150 kHz. [3]

5.3 SHDSL

SHDSL (Single pair HDSL) byl standardizován pod označením ITU-T G.991.2. Vychází z koncepce HDSL, a jak už z názvu vyplývá, je zde při přenosu využitý jediný symetrický pár s možností využití i opakovací. V obou směrech je možné dosáhnout symetrických rychlostí od 192 kbit/s až do 2312 kbit/s. Na rozdíl od HDSL je k přenosu bitů využita 16-stavová pulsně amplitudová modulace s mřížkovým (trellis) kódováním (16-TCPAM, někdy 32-TCPAM). Mříž-

Tabulka 5: Možný překlenutelný útlum a vzdálenost pro SHDSL. [3]

přenosová rychlost [kbit/s]	fr [kHz]	střední úroveň rušení		vysoká úroveň rušení	
		překlenutelný útlum [dB]	typická překlenutelná vzdálenost [km]	překlenutelný útlum [dB]	typická překlenutelná vzdálenost [km]
384	150	50	4,8	43	4,1
512	150	44	4,2	37	3,5
1024	150	32	3	25,5	2,4
2048	200	24	2,1	17,5	1,6
2304	200	21,5	1,9	15,5	1,4

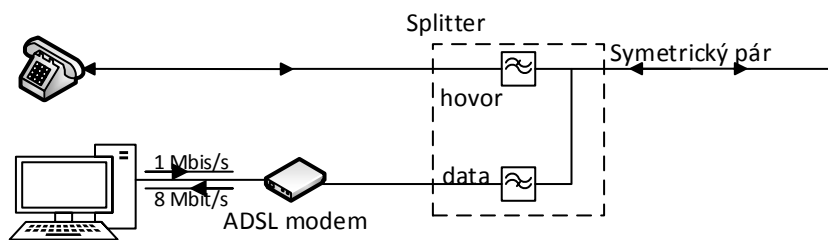
kové kódování zajišťuje dobré podmínky pro správné detekování i pokud dojde ke zvětšení šumu na trase, tudíž dochází ke zlepšení šumové imunity (zisk pomocí kódování až 6 dB). Také se vyznačuje oproti HDSL složitější funkční strukturou se striktním oddělením přenosové a aplikační části. Stejně jako u předešlé technologie je i zde využita metoda EC pro potlačení ozvěn umožňující obousměrný přenos. SHDL připouští využití i dvou symetrických párů, i když je to v rozporu se samotným názvem technologie. Při této variantě se přenosová rychlost zdvojnásobí a proto je možné dosáhnout hodnot od 384 kbit/s do 4,624 Mbit/s. [3]

Tabulka č.5 uvádí pro některé přenosové rychlosti překlenutelný útlum na referenčním kmitočtu ($f_r = 150$ kHz) při střední a vysoké úrovni šumu. Navíc je zde uvedena i překlenutelná vzdálenost pro kabel s průměrem žíly 0,4 mm. Střední úroveň rušení lze pokládat za rušení způsobené přeslechy z ostatních párů v mnohapárovém kabelu, kde na čtvrtině párů jsou provozovány digitální systémy (xDSL, ISDN, PCM). Budou-li se poté provozovat na všech párech digitální systémy v mnohapárovém kabelu, pak se bude jednat o vysokou úroveň šumu. Při adaptivním nastavení přenosové rychlosti dochází k automatickému nastavení nejvyšší možné přenosové rychlosti, u které musí být chybovost nižší než 10^{-7} , i kdyby úroveň šumu vzrostla o 6 dB (šumová rezerva 6 dB).[3]

5.4 ADSL

ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) se vyznačuje nesymetrií přenosových rychlostí, což je patrné už ze samotného názvu. Data je možno přenášet ve směru k uživateli s rychlostí až 8 Mbit/s a ve směru opačném lze dosáhnout přenosové rychlosti do 1 Mbit/s. Oproti HDSL a SHDSL je digitální signál přenášen v přeloženém pásmu (nad hovorovým pásmem) a umožňuje současný provoz s analogovou telefonní (POTS) nebo ISDN službou.

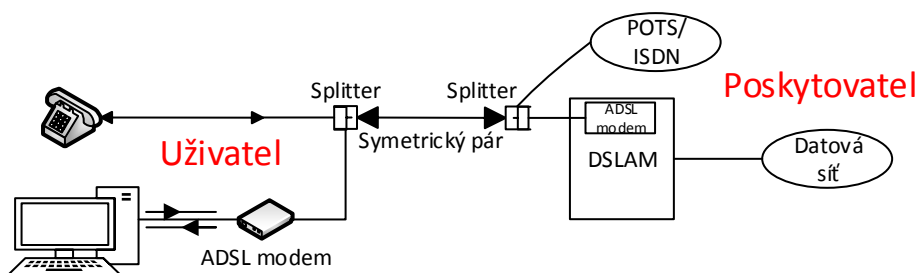
Důležitou roli zde hraje zařízení zvané splitter, který zajišťuje oddělení hovorového pásma a ADSL pásma za pomoci pasivních filtrů. Filtry jsou konstruované jako dolní a horní propust. Dolní propust propouští hovorové pásmo do 3,4 kHz u POTS nebo pásmo do 8 kHz u ISDN. Naopak horní propustí prochází jen spektrum určené pro ADSL modem. Díky splitteru je možné



Obrázek 30: Ukončení ADSL linky na straně účastníka.[3]

provozovat obě služby (hovor, ADSL) na jediném metalickém vedení. Ve většině případů je horní propust už součástí ADSL modemu. Při rozdělení signálu na straně účastníka je jedna část přivedena do ADSL modemu, kde je odstraněn hovorový signál a druhá část je vedena do telefonního přístroje. Podobná situace oddělení obou signálů nastává i na straně ústředny. Pokud se nevyžaduje provoz POTS či ISDN s ADSL linkou, tak není potřeba mít splitter. Typické ukončení ADSL linky na straně účastníka vyobrazuje obrázek č. 30. Dále na obrázku č.31 je možné si prohlédnout propojení ADSL linky mezi uživatelem a poskytovatelem za současného provozu s hovorovou službou za pomoci splitterů.

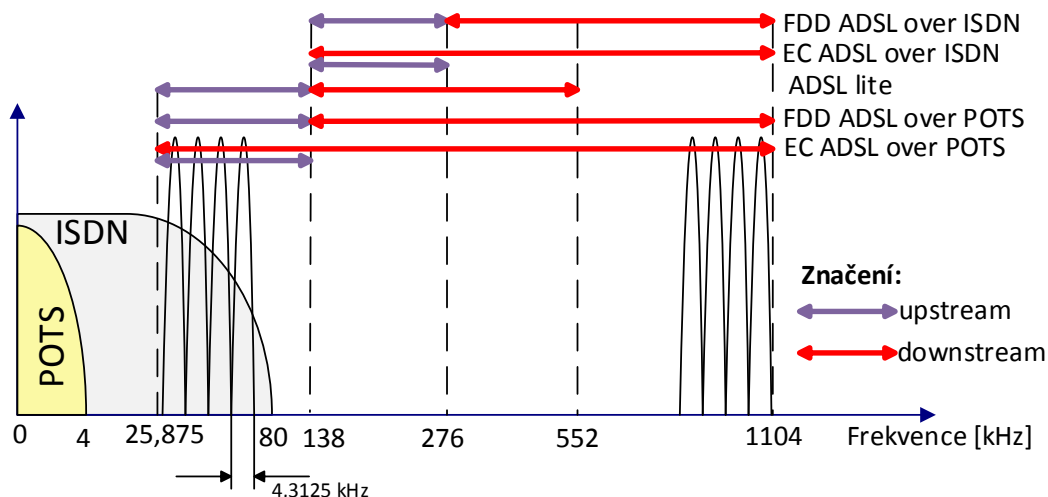
Při vývoji standardu se řešila otázka, jaká modulační technika při přenosu bude využita. Rozhodovalo se mezi modulacemi CAP, DMT, QAM. Nakonec byla metoda DMT standardizována v doporučení ITU-T G.992. [3]



Obrázek 31: Architektura ADSL.[3]

DMT (Discrete Multi-Tone) modulace se vyznačuje více nosnými kmitočty. Přenosový kanál je rozdělen ve frekvenční oblasti do několika dílčích toků (subkanálů) a na každý dílčí tok je aplikována kvadrurní amplitudová modulace QAM. ADSL využívá přenosové pásmo od 0 až 1,104 MHz, které je rozděleno do 256 subkanálů (číslovány 0 až 255) s kanálovou roztečí 4,3125

kHz. Při současném provozu s POTS nebo ISDN zůstávají spodní subkanály nevyužity, jelikož je tahle část spektra určena právě pro hovorové služby. Na základě využívané hovorové služby rozlišujeme ADSL over POTS a ADSL over ISDN. Pro oddělení obou směrů na jednom vedení je aplikována metoda frekvenčního dělení FDD, tudíž každý směr má své vyhrazené frekvenční pásmo. [3]



Obrázek 32: Obsazení spektra pro jednotlivé ADSL varianty.[3]

V případě ADSL over POTS (G.992.1 Annex A) jsou směry upstream a downstream odděleny kmitočtem 138 kHz nacházející se mezi subkanály č. 32 a 33. Ve druhém případě u ADSL over ISDN (G.992.1 Annex B) přenos začíná až na frekvenci 138 kHz. Další možností pro oddělení směrů upstream a downstream se využívá metoda potlačení ozvěn EC (Echo Cancelling). Tato metoda umožňuje překrytí pásem obou přenosových směrů, a proto bylo rozšířeno frekvenční pásmo pro downstream o upstream pásmo. Ve srovnání s FDD je EC sice více nákladné, ale lépe využívá frekvenční pásma. S rozšířením sestupného pásma přichází i úskalí. Při nasazení většího množství ADSL přípojek v jednom kabelu se projevují vlastní přeslechy na blízkém konci (SNEXT) vzhledem k vzestupnému pásmu mezi jednotlivými přenosovými páry. Tento jev ovlivňuje celkový možný počet nasazení ADSL přípojek v jednom kabelu. U metody FDD lze tento jev zanedbat. Oproti plné variantě ITU-T G.992.1 (někdy označována G.DMT) vznikla i redukovaná LITE varianta specifikovaná v doporučení ITU-T G.992.2. ADSL LITE se vyznačuje poloviční šířkou pásma do 552 kHz oproti pásmu do 1104 kHz v rámci plné varianty ADSL. V tabulce č.6 jsou uvedeny nejčastěji využívané varianty ADSL s využívanými rozsahy pásem a teoretickou přenosovou rychlostí při využití pilotních kmitočtů, které obsadí daný subkanál, který poté není možné využít pro přenos dat. Pilotní kmitočty se vyskytují takto: [3]

- ADSL over POTS-frekvence 276 kHz (subkanál č. 64)

- ADSL over ISDN-frekvence 414 kHz (subkanál č. 96)

Tabulka 6: Varianty ADSL.[3]

Varianta ADSL	upstream				downstream			
	počet subkanálu	od kHz	do kHz	max. rychlost [Mbit/s]	počet subkanálu	od kHz	do kHz	max. rychlost [Mbit/s]
ADSL-ITU-T G.992.1								
EC over POTS	26 (6-31)	25	138	1,5	250 (6-255)	25	1104	15
FDD over POTS	26 (6-31)	25	138	1,5	224 (32-255)	138	1104	13,4
EC over ISDN	32 (32-63)	138	276	1,86	224 (32-255)	138	1104	13,4
FDD over ISDN	32 (32-63)	138	276	1,86	198 (65-225)	276	1104	11,8
ADSL lite-ITU-T G.992.2								
EC over POTS	26 (6-31)	25	138	1,5	122 (6-127)	25	552	7,3
FDD over POTS	26 (6-31)	25	138	1,5	96 (32-127)	138	552	5,7

5.5 ADSL2/ADSL2+

Výsledkem vývoje technologie ADSL je druhá generace ADSL2, která je standardizována s označením ITU-T G.992.3, G.992.4 (splitterless). Novinkou bylo zavedení flexibilní struktury rámce s proměnnou délkou, což umožňovalo snížení přenosu režijních informací v záhlavích až pod 1 kbit/s. Nově lze i přizpůsobovat přenosovou rychlost bez rozpadu spojení na základě šumových parametrů a vysílacího výkonu, který je možno měnit. Nový standard nabízel již účastníkům maximální teoretickou přenosovou rychlost 12 Mbit/s ve směru downstream a 1 Mbit/s ve směru upstream. ADSL2 zachovává existující varianty přípojek a oproti minulé generaci navíc přichází s plně digitálním režimem (ADM - ALL Digital Mode), kde se již dolní subkanály nevyužívají pro hovorové služby, ale už jen pro data. Tímto způsobem se zvýšila propustnost ve směru upstream až přes 2 Mbit/s (G.992.3 ANNEX J). Další varianta RE-ADSL2 (Reach Extended) je určena pro dlouhé vzdálenosti. To je docíleno zúžením upstream pásma, což umožňuje eliminovat přeslechy typu NEXT. Nejčastěji se zúží pásmo upstream na subkanály 6 až 23 a to dovoluje při 20 % obsazení kabelu prodloužit dosah linky ze 4,5 na 5,5 km.

S dalším vývojovým stupněm technologie ADSL/ADSL2 je spjata poměrně vyšší přenosová rychlost. Nový standard ADSL2+ (ITU-T G.992.5) se vyznačoval rozšířením kmitočtového pásma, což mělo pozitivní důsledky na celkovou propustnost. Původní horní kmitočet 1104 kHz byl posunut na jeho dvojnásobnou hodnotu, tedy 2208 kHz. Výsledkem rozšíření přenosového pásma bylo možné dosáhnout teoretické rychlosti až 24 Mbit/s v sestupném směru. Za další vývoj lze pokládat variantu zvanou ADSL2++, která posunuje horní kmitočet až na hodnotu 3,75 MHz. Tato varianta sice nebyla nikdy standardizována, ale je schopna konkurovat VDSL technologii. [3][10]

5.6 VDSL

Přípojka VDSL (Very high Digital Subscriber Line) je standardizována v doporučení pod označením ITU-T G.993.1 a poskytuje větší přenosové rychlosti než technologie ADSL. Navíc nabízí

Tabulka 7: Varianty další generace ADSL. [10]

Označení	Standard	Downstream max. přenosová rychlost [Mbit/s]	Upstream max. přenosová rychlost [Mbit/s]
ADSL2	ITU-T G.992.3	12	1
ADSL2	ITU-T G.992.3 Annex J	12	3,5
RE-ADSL2	ITU-T G.992.3 Annex L	5	0,8
splitterless ADSL2	ITU-T G.992.4	1,5	0,5
ADSL2+	ITU-T G.992.5	24	1
ADSL2+M	ITU-T G.992.5 Annex M	24	3,5

symetrické a nesymetrické přenosové rychlosti. V rámci symetrické varianty je možné dosáhnout přenosové rychlosti 26 Mbits/ v obou směrech. U nesymetrické varianty je přenosová rychlost ve směru sestupném až 52 Mbit/s a v opačném směru (vzestupný směr) až 6,4 Mbits/s. Ve skutečnosti se přenosová rychlost může lišit od maxima. Záleží zde na mnoha faktorech (např. útlum a délka vedení). Stejně jako u ADSL je možné současně s VDSL provozovat POTS nebo ISDN. K oddělení hovoru a VDSL signálu se taktéž využívá funkce rozbočovačů, a tudíž uspořádání sítě je totožné jako v případě ADSL (obrázek č.31). Velký nárůst přenosové rychlosti je dosažen rozšířením kmitočtového pásma až k 12 MHz. Nevýhodou je, že technologie je limitována malým dosahem okolo 1,6 km. Oddělení přenosových pásem pro upstream a downstream je zde realizováno pomocí frekvenčního dělení. Metoda potlačení ozvěn se nevyužívá, jelikož pokud by došlo k překrytí obou pásem, které se zde vyznačují vyššími kmitočty oproti ADSL, tak by důsledkem jevu NEXT, došlo k výraznému snížení odstupu signálu od šumu. VDSL standard připouští dvě vzájemné nekompatibilní metody pro Evropu využívající rozdílné modulace:

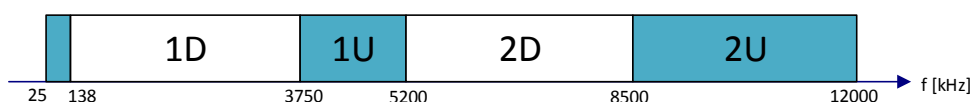
- **MCM (Multi-Carrier Modulation)** - jedná se o modulaci s více nosnými kmitočty, přesněji modulace DMT, která byla ověřena už na technologii ADSL. Každá nosná tvoří subkanál se šířkou pásma 4,31325 kHz (stejně jako u ADSL). Oproti ADSL obsahuje více subkanálů a to až 4096. V současné době mnoho využívané, jelikož se jeví jako perspektivnější varianta.
- **SCM (Single-Carriers Modulation)** - modulace s jednou nosnou v rámci jednoho pásma. Mezi zástupce patří modulace QAM nebo CAP. Využívané hlavně v první etapě VDSL.

Při přidělování pásem pro sestupný a vzestupný směr je nutno brát v potaz tři hlavní aspekty:

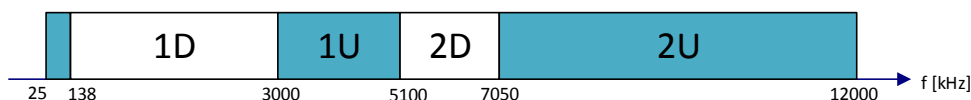
- **Kompatibilitu s ADSL.** V případě využívání ADSL a VDSL se spektra překrývají v intervalu 138 až 1104 Mhz. Pokud se nachází VDSL v místě ústředny, je nutné pro správnou

funkci eliminovat přeslech NEXT. To se provádí tak, že VDSL přenáší v uvedeném pásmu také sestupný tok jako ADSL. Pokud se VDSL nachází v optickém rozvaděči (na trase mezi ústřednou a zákazníkem), je nezbytné potlačit zároveň jevy NEXT i FEXT, a proto se provádí navýšení dolního kmitočtu VDSL pásma.

- **Symetrický a nesymetrický režim.** Jednotlivé režimy mají rozdílné nároky na šířku pásma. Při výskytu více párů v jednom kabelu, je nutné zajistit, aby jednotlivé páry využívaly systémy v symetrické či nesymetrické variantě totožné frekvenční schéma pro potlačení jevu NEXT.
- **Snižování horního mezního kmitočtu.** Rostoucí délka vedení a horní mezní kmitočet VDSL má negativní vliv na přenos. S rostoucí délkou vedení je potřeba snižovat horní kmitočet VDSL, jelikož se začíná projevovat útlum, který má negativní vliv na odstup signálu od šumu. Naopak na krátké vzdálenosti je efektivnější posunout horní mezní kmitočet směrem k vyšším frekvencím.



Obrázek 33: Asymetrický kmitočtový plán ("998").[3]



Obrázek 34: Symetrický kmitočtový plán ("997").[3]

Řešením zmíněných problémů je rozdělení celkového pásma na větší počet dílčích pásem, tudíž místo jednoho pásma v sestupném směru vzniknou 2 subpásma (1D, 2D) a stejná filozofie je aplikovaná i ve směru opačném (1U, 2U). Zároveň se tyto jednotlivé pásma střídají. Pro rozložení těchto pásem byly navrženy dvě schémata, tedy plán A (obrázek č.33) a plán B (obrázek č.34). Plán A neboli označení "998" je výchozí varianta pro Severní Ameriku. Spolu s plánem B označovaného "997" jsou navrženy do maximálního kmitočtu 12 MHz. Na krátké vzdálenosti se uvažuje o posunutí pásma nad 12 MHz. Při přenosu je možno i využití pásma od 25 až do 138 kHz. Další schéma zobrazené na obrázku č.35 obsahuje už jen dvě pásma (1D a 1U) a umožňuje odstranit rušení mezi ADSL a VDSL a to tak, že pásmo 1D začíná až od kmitočtu 0,9 MHz. Schéma na obrázku č.35 je využíváno některými modemy pro symetrický přenos rychlostí 10 Mbit/s, které jsou určené pro LAN sítě.



Obrázek 35: Zjednodušené schéma s dvěma pásmy.[3]

Maximální hodnota výkonu v sestupném pásmu dosahuje hodnoty 14,5 dBm a to jen, pokud je VDSL umístěno na ústředně (FTTEx). V případě, kdy se VDSL nachází v rozvaděči (FTT-Cab), je limitní hodnota 11,5 dBm. Ve vzestupném směru maximální výkon dosahuje hodnoty 11,5 dBm. V praxi mohou být hodnoty výkonu nižší v důsledku omezování vysílacího výkonu PBO (Power-back-off). Tato funkce PBO omezuje vzájemné rušení jednotlivých VDSL (nebo i ADSL) systémů nasazených na stejném kabelu.

5.7 VDSL2

Druhá generace VDSL byla standardizována pod označením ITU-T G.993.2 (VDSL2). Oproti VDSL první generaci obsahuje mřížkové kódování (Trellis Code) pro opravu jednotlivých bitových chyb, což přebírá od ADSL2. VDSL 2 se vyznačuje opravou shluků chyb zapříčiněné impulsním rušením a to pomocí Reed-Solomon kódu a prokládáním dat, které sice zvyšuje zpoždění, ale snižuje odolnost proti impulznímu rušení. Zásadním krokem ve srovnání se svým předchůdcem je rozšíření kmitočtového pásma až na 30 MHz, ale jen za cenu 2x větší šířky subkanálu na 8,625 kHz. Díky tomuto rozšíření je možné dosáhnout přenosové rychlosti až 100 Mbit/s v obou směrech (teoreticky až 200 Mbit/s). Takové rychlosti je možné dosáhnout až do vzdálenosti 500 m. Na 1 km přenosová rychlost se pohybuje okolo 50 Mbit/s. Pokud není využito 30 MHz kmitočtové pásmo, šířka subkanálu má standardní velikost 4,3125 kHz. Bohužel zvýšením přenosového pásma na 30 MHz dochází k poklesu maximální dosažené vzdálenosti, jelikož vlivem rostoucího kmitočtu roste i útlum. Stejně jako u VDSL, je možné provozovat současně s přípojkou VDSL2 i služby POTS nebo ISDN.

Zabezpečení dat proti chybám vzniklých při přenosu probíhá podobně jako u ostatních technologií xDSL. VDSL2 využívá pro detekci chyb zabezpečovací 8 bitové slovo, které vznikne výpočtem cyklického kódu CRC (Cyclic Redundancy Check). Pro dopřednou korekci chyb FEC je využit RS (Reed-Solomon) kód, který ve spojení s prokládáním poskytuje dobrou ochranu proti krátkým shlukům chyb. RS kód vytvoří zabezpečovací část skládající se z 0 - 16 bitů. Tato část se poté připojí k datovému bloku.

VDSL2 připouští jedinou modulační metodu DMT, která je popsána výše. Počet stavů modulace se pohybuje v intervalu 4 až 32768, kdy lze tedy jedním stavem přenést 2 nebo až 15 bitů. Pokud se využívá rozteč subkanálu 4,3125 kHz je modulační rychlost stavena na 4 kD. Při dvojnásobném zvětšení šířky subkanálu na 8,625 kHz (jen pro pásmo 30 MHz), dochází i ke

zvětšení modulační rychlosti ve stejném poměru na 8 kBd.[20]

V přílohách doporučení ITU-T G.992.3 jsou určeny 3 typy přípojek:

- Annex A - VDSL2 pro Severní Ameriku, plán 998
- Annex B - VDSL2 pro Evropu, plán 997 i 998
- Annex C - VDSL2 pro Japonsko, plán 998[20]

Jak již bylo řečeno, rozšíření kmitočtového pásma vede ke snížení maximální délky vedení. Pro rozdílné požadavky různých služeb a pro další důvody byly stanoveny různé šířky kmitočtového pásma tzv. přenosové profily. Jednotlivé profily se odlišují horním mezním kmitočtem (kolem 8 MHz, 12, 17, 30 MHz), šířkou subkanálu a maximálním výkonem signálu (odlišeno písmeny a až d). Jednotlivé profily jsou znázorněny v tabulce č. 8.

Tabulka 8: Přenosové profily VDSL2 pro Evropu.

Profil	Maximální výkon ve směru downstream [dBm]	Maximální výkon ve směru upstream [dBm]	Šířka subkanálu [kHz]	MBDC [Mbit/s]
8a	17,5	14,5	4,3125	50
8b	20,5	14,5	4,3125	50
8b	11,5	14,5	4,3125	50
8d	14,5	14,5	4,3125	50
12a	14,5	14,5	4,3125	68
12b	14,5	14,5	4,3125	68
17a	14,5	14,5	4,3125	100
30a	14,5	14,5	8,625	200

Parametr MBDC (Minimum Bidirectional Net Data Rate) vyskytující se v tabulce č. 8 představuje minimální přenosovou rychlost, která je počítána jako součet přenosových rychlostí v obou směrech.

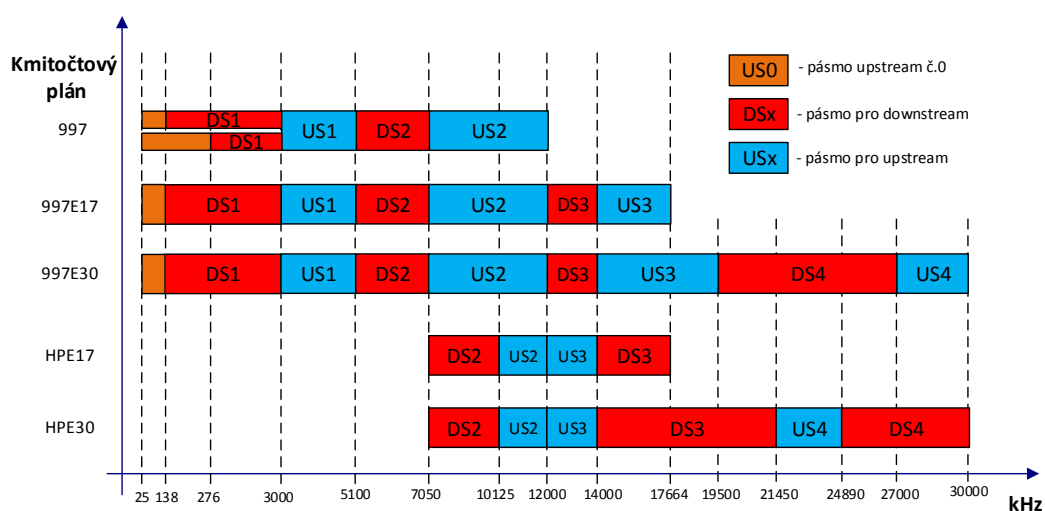
Annex B definuje různé kmitočtové plány pro Evropu. Tyto plány jsou založeny na plánech 997 a 998, které vycházejí z přípojky VDSL (ITU-T G.993.1).

Pro symetrický režim je určen plán 997, který je dále dělen:

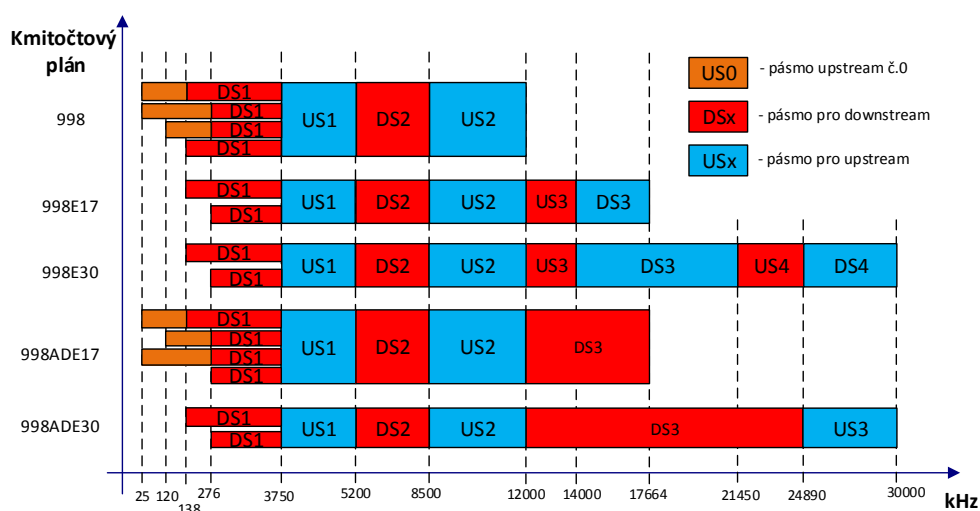
- 997 - totožný kmitočtový plán jako u VDSL s obvyklým střídáním obou pásem. Pásmo až do 12 MHz.
- 997E - opět se střídají pásma pro oba směry, ale navíc až do 17 MHz nebo 30 MHz.
- HPE - speciální kmitočtový plán fungující v rozsahu 7,05 MHz až 30 MHz. [20]

Pro asymetrický režim je určen plán 998, který je dále dělen:

- 998 - základní kmitočtový plán jako u VDSL s obvyklým střídáním obou pásem. Využité pásmo až do 12 MHz.
- 998E - rozšíření základního plánu 998 až do 17 MHz nebo 30 MHz.



Obrázek 36: Kmitočtové plány pro symetrický režim.[20]



Obrázek 37: Kmitočtové plány pro asymetrický režim.[20]

- 998ADE- výhodný pro datový přenos. Plán se vyznačuje výrazně asymetrickými rychlostmi. Ve verzi do 17 i 30 MHz.[20]

Dále je možné rozlišovat přípojky VDSL2 na základě využití nejspodnějšího upstream pásma - US0. Využívání těchto pásem není nutné. Při jejich využití je nutno brát v potaz, aby zvolená pásma US0 nezasahovaly do pásma využívané službami POTS či ISDN. Podle využití pásma USO lze rozlišovat VDSL2 over POTS, VDSL2 over ISDN, VDSL2 over ADM.

6 Triple play služby

Podle názvu lze už tušit, že se jedná o spojení tří služeb. Přesněji se jedná o službu přenosu videa (IPTV), přenosu hlasu (VoIP) a dat. Triple play je nabízen jako balíček poskytovatelem služeb (ISP- Internet Service Provider) za výhodnější cenu, než kdyby byly jednotlivé služby nabízeny jednotlivě. Zprostředkování těchto služeb se děje jen prostřednictvím jedné sítě a to internetu založeném na IP protokolu.

6.1 Kvalita služby QoS

Kvalita služeb QoS (Quality of Service) zaručuje, že určitá přenosová služba bude mít vyhrazeno určité množství zdrojů a tím pádem bude daný provoz doručen v pořádku a včas. Cílem QoS je umožnit nastavení kvality přenosu pro data přenášená sítí. Dnešní konvergované sítě jsou založeny na Internetovém Protokolu (IP). Většina současných počítačových aplikací, stejně jako Internet, jsou také založeny na IP protokolu. IP sítě jsou velmi flexibilní a efektivní, ale nemají garantované minimální zpoždění, které je velmi potřebné pro zvuk ve vysoké kvalitě a video služby. Starší IP sítě mohou nabízet jen best-effort služby, což nezaručuje, že se data neztratí nebo neopozdí, proto bylo nutné provést update IP tak, aby podporovala kvalitu služeb QoS. [38] Pro zajištění kvality služeb v IP sítích se využívají následující techniky:

- **Předimenzování spoje** - jsou využívány hlavně v LAN sítích. Ve WAN sítích se jeví jako velmi neefektivní technika.
- **Rezervace síťových zdrojů** - je založena na tom, že aplikace, která potřebuje určité množství přenosových prostředků, provede jejich rezervaci. Pro dané spojení si síťové prvky rezervují část ze svých prostředků, které jsou během přenosu využity jen samotným spojením. Po přenosu jsou vyčleněné prostředky opět volné. Typickým zástupcem je technologie IntServ (Integrated Services) využívající protokol RSVP (Resource Reservation Protocol) pro rezervaci cesty. IntServ je náročná pro provádění a implementaci. Navíc je nutnost, aby IntServ byla podporována koncovými stanicemi, mezi kterými se rezervace vytváří, a všemi směrovači na cestě.
- **Prioritní mechanismy** - se řídí určitou definicí, na základě které bude priorita provedena. Technologie pracující s touto metodou jsou aplikovány na různých úrovních komunikace. Mezi představitele řadíme DiffServ (Differentiated Services), MPLS (Multiprotocol Label Switching) a SBM (Subnet Bandwidth Management). V případě DiffServ se jedná o nejpoužívanější metodu. Tato metoda využívá třídění provozu do tříd. Každý paket vstupující do sítě je označen značkou, která určuje třídu přenosu. Na základě této značky je na směrovačích řízen způsob zpracování paketu. [45]

6.1.1 End-to-end výkonové parametry

Pro poskytnutí QoS je důležité najít soubor parametrů pro kvantifikaci a porovnávání výkonnosti sítě. Z hlediska QoS je důležité, jak danou službu vnímá koncový uživatel (zákazník). Na základě tohoto důvodu je QoS specifikováno prostřednictvím koncových parametrů. IPPM (Internet Protocol Performance Metrics) je v IETF pracovní skupinou, která definuje standardní metriky pro vyhodnocování výkonnosti sítě. Tyto metriky jsou určeny pro dimenzování a návrhy síťových zařízení, ale i pro ověření kvality QoS a SLA. V případě QoS existují alespoň 4 následující metriky:

- zpoždění (delay),
- kolísání zpoždění (jitter),
- paketová ztrátovost (packet loss),
- propustnost (bandwidth). [38]

Tabulka 9: QoS požadavky pro různé aplikace. [38]

Typ přenosu	Přenosová šířka	Ztrátovost paketů (max)	Zpoždění (max)	Jitter (max)
Interaktivní hlas (G.711)	12-106 kbit/s	1 %	150 ms	30 ms
Streamované video (MPEG-4)	0,005-10 Mbit/s	2 %	5000 ms	Necitlivé
Streamované audio (MP3)	32-320 kbit/s	2 %	5000 ms	Necitlivé
Data	Proměnlivá	Citlivé	Necitlivé	Necitlivé

Skupina IPPM vydala také RFC (Request for Comments) dokumenty, které se zabývají těmito parametry.

6.2 IPTV

Již v dnešní době má digitální televizní vysílání několik podob - satelitní vysílání (DVB-S, DVB-S2), kabelové vysílání (DVB-C), pozemní digitální vysílání (DVB-T, DVB-T2) a vysílání pro mobilní telefony (DVB-H). Další možností pro sledování digitálního vysílání je IPTV (Internet Protocol Television). IPTV v sobě zahrnuje televizní vysílání, video na přání (VoD - Video on Demand) a audio obsah (radio). IPTV je poskytována pouze prostřednictvím vysokorychlostních datových sítí založených na IP protokolu. [46]

K zajištění uspokojivého QoE (kvalita prožitku ze služby) stanovilo **DSL Forum TR-126** doporučené hodnoty parametrů týkající se IP provozu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10: Doporučené minimální přenosové parametry pro IPTV[48]

Kodek	Obraz	Bit Rate [Mbps]	Zpoždění [ms]	Jitter [ms]	Ztrátovost
MPEG-2	SDTV	3 - 5	<200	<50	<5,26E-6
MPEG-2	HDTV	15 - 18,1	<200	<50	<1,16E-6
MPEG-4	SDTV	1,75 - 3	<200	<50	<5,85E-6
MPEG-4	HDTV	8 - 12	<200	<50	<1,22E-6

6.2.1 Architektura IPTV

Architekturu sítě poskytující IPTV lze rozdělit na 4 následující části:

- Head-end - je nazývané také jako video distribuční centrum. V této části se obstarávají video nebo audio signály, které se následně budou vysílat do sítě ve formě IP paketů směrem k uživatelům. Způsoby získání signálu mohou být různé, například ze satelitního (DVB-S, DVB-S2), pozemního (DVB-T, DVB-T2) nebo kabelového (DVB-C) vysílání. Následně signály zde mohou komprimovány. Nejčastěji využívané komprese jsou například MPEG MPEG-2, MPEG-4/H.264, VC-1. Konečné vysílání IPTV obsahu může probíhat v multicast (TV kanály) a unicast režimu (VoD).
- Distribuční síť - musí odesílat audiovizuální signály přes regionální a metropolitní sítě, dokud se nedostanou k zákazníkovi. Vysokokapacitní jádro musí zajistit pomocí protokolů RTP nebo RTSP, aby každému IP paketu v multicast nebo unicast režimu nebyla snížena kvalita parametrů, jako je zpoždění či ztrátovost. Distribuční sítě jsou IP orientované a většinou využívají pro přenos Ethernet. Často je využito nástrojů MPLS nebo VPLS, které přetváří best-effort síť (případ IP a Ethernetu) na síť zajišťující kvalitu. Výhoda MPLS spočívá v tom, že pro směrování nevyužívá dlouhé síťové adresy, ale krátké návěští. Tím odpadá prohledávání směrovacích tabulek a stává se rychlejším řešením.
- Přístupová síť - zajišťuje spojení mezi poskytovatelem služeb a uživatelem. V rámci přístupové sítě mohou být využity technologie jako ADSL2, ADSL2+ VDSL2, FTTN, FTTH

a WiMAX. Výběr vhodné technologie bude záviset na parametrech, jako je požadovaná šířka pásma, vzdálenost a cena.

- Uživatelský prostor - zde jsou IP pakety převedeny na video stream. K přehrávání IPTV obsahu je vyžadován osobní počítač (PC) nebo set-top box (STB) připojený k televizoru. Podporovány jsou také PDA nebo chytré mobilní zařízení. V případě přepínání kanálu IPTV se uplatňuje protokol IGMP. Při přepnutí kanálu je uživatel odhlášen z jedné multicastové skupiny a následně přihlášen do nové, kde je vysílán požadovaný program. V případě VoD je interakce mezi uživatelem a sítí řízena pomocí protokolu RTSP. [38]

6.2.2 IPTV služby

Kromě televizních a rozhlasových programů nabízí IPTV doplňkové služby. Ty základní jsou následující:

- **Video na přání (VoD)** - služba VoD se mírně liší od přímého přenosu IPTV, protože vyžadují vytvoření spojení unicast typu point-to-point mezi serverem a účastníkem. Video na přání VoD umožňuje účastníkům vybrat a sledovat uložená videa interaktivně přes IP síť. Jedná se o zpoplatněnou službu, ale někdy jsou některá videa k dispozici zdarma. VoD disponuje dvěma důležitými funkcemi:

1. Uživatelé si mohou zvolit video, které chtějí sledovat z digitální knihovny, a také mohou určit, od jakého okamžiku sledování začne.
2. Umožňuje využívat funkce pocházející z videorekordéru a DVD, respektive se jedná se o funkce jako start, pauza, stop, přetáčení videa dopředu, přetáčení videa dozadu. Tyhle funkce jsou poskytovány protokolem RTSP.

Existuje mnoho různých implementací VoD, které lze rozdělit do dvou skupin, v závislosti na tom, zda je obsah streamován, nebo je stažen. Streamování služby VoD v reálném čase umožňuje stahování videa přímo ze serveru do televizoru. V důsledku toho jsou QoS požadavky podobné jako u IPTV. Druhou možností je požadovaný obsah VoD nejprve stáhnout na pevný disk pomocí best-effort a poté jej sledovat. Bez ohledu na implementaci je VoD nejdůležitějším zdrojem příjmů balíčku Triple Play. Počet uložených videí, jako jsou filmy, videoklipy, sportovní události a další, mohou být natolik rozsáhlé, že tradiční video obchody se jim nemohou rovnat. Navíc tyto pořady jsou vždy k dispozici oproti tradičním video obchodům. [38]

- **Elektronický programový průvodce (EPG - Electronic Programming Guide)** - jedná se o elektronickou podobu televizního programu. TV program se zobrazuje přímo na obrazovce televizoru a obsahuje program na celý týden dopředu. Navíc se u každého pořadu nachází jeho detailnější popis a fotografie. V programu je také možno vyhledávat filmy podle režisérů, herců či žánrů. [53]

- **Placené pořady (PPV - Pay Per View)** - PPV služba umožňuje si objednat konkrétní televizní pořad či událost, která je vysílána v pevný čas. Provozovatel vysílá událost současně všem, kteří si ji objednali. Služba PPV umožňuje tyto události sledovat živě, zatímco služba VoD umožňuje divákům vidět kdykoli daný přenos jen ze záznamu. Nejčastěji jsou tak nabízeny sportovní zápasy. [53]
- **Osobní záznam videa (PVR)** - služba Personal Video Recording poskytuje uživatelům větší flexibilitu při sledování televize. Každý účastník má svůj vlastní úložný disk nacházející se buď v prostorách uživatele nebo někde v síti. Na tento disk je uživateli umožněno nahrávat libovolný pořad, který si bude moci kdykoli přehrát ze záznamu, podobně jako u videorekordéru. Služba PVR zahrnuje:
 1. Osobní síťový video záznam (NPVR - Network PVR) - programy jsou ukládány na server poskytovatele.
 2. Klientův osobní video záznam (CPVR - Client PVR) - programy jsou ukládány na pevný disk v prostorách uživatele (set-top-box s HDD).
 3. TV s časovým posunem - funkce, která kombinuje nahrávání videa a streamování v reálném čase. Uživateli, který sleduje program s určitým časovým zpožděním, je umožněno přeskočit reklamní sekce nebo se v průběhu živého vysílání vrátit zpět do nějakého časového bodu. Záměrem této funkce není nahrávat celý pořad.
 4. TV posledního týdne - tato funkce umožňuje přehrát pořady, které se vysílaly v průběhu posledního týdne. [38]

6.2.3 Video a audio kodeky

Existuje množství specifikací kodeků (kodér-dekodér) pro audiovizuální signály, které umožňují kódování, kompresi a streamování audiovizuálního obsahu. Mezi nejznámější patří série kodeků MPEG (Moving Picture Expert Group) definovaná dle ISO/IEC a ITU-T. Dalším řešením může být Windows Media od společnosti Microsoft. Jedná se o zajímavý kodek, který zvažují mnozí z nových poskytovatelů IPTV obsahu.[38]

- **MPEG-1 (ITU-T H.261)** - byl zveřejněn roku 1993 a v té době byl prvním standardizovaným digitálním video kodekem, který umožnil vývoj z analogové dimenze do digitální dimenze a to bez ohledu na analogové standardy. MPEG-1 komprimuje a kóduje zvuk a video o rychlosti okolo 1,5 Mbits. Kodek poskytuje video s rozlišením stejným jako u VHS kazet. MPEG-1 se zaměřoval na první generaci audio a video CD-ROM aplikace. Audio částí kodeku MPEG-1 je MP3, který se stal velmi populární díky Internetu a digitálnímu rádiu.
- **MPEG-2 (ITU-T H.262)** - jedná se o zdokonalenou verzi MPEG-1 z roku 1995, která poskytuje širší rozsah rychlostí od 2 do 20 Mbit/s. Dále umožňuje několik úrovní kvality

Tabulka 11: Šířka pásma jednotlivých standardů pro SDTV a HDTV. [38]

	Rozlišení	MPEG-2	MPEG-4 Part 10 (H.264)	VC-1 (WM9)
SDTV	704 x 480	3,5 Mbit/s	2 - 3,2 Mbit/s	2 - 3,2 Mbit/s
HDTV	1920 x 1080	15 Mbit/s	7,5 - 13 Mbit/s	7,5 - 13 Mbit/s

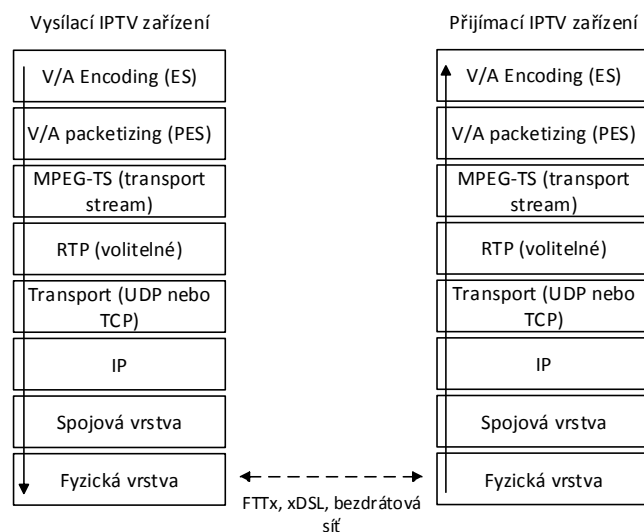
i několik rozlišení obrazovky videa. MPEG-2 aplikace jsou velmi populární od poloviny 90. let a využívají se v družicích, kabelech, DBS (Direct Broadcast Satellite), DVD a v počátečních implementacích IPTV.

- MPEG-4 part 10 (ITU-T AVC/H.264) - je velmi flexibilní kodek z roku 1999 umožňující rychlosti od 5 kbit/s až do 10 Mbit/s, tudíž je vhodný pro mobilní video, standardní rozlišení i pro HD TV (High-definition television). MPEG-4 dovoluje ušetřit polovinu z přenosové rychlosti ve srovnání s H.262, čehož využívají hojně poskytovatelé IPTV.
- MPEG-H part 2 (ITU-T HEVC/H.265) - je nejnovější kodek, který byl schválen roku 2013. Snižuje datový tok na polovinu při zachování stejné kvality oproti svému předchůdci H.264, a proto je v současné době více nasazován novými poskytovateli IPTV. Navíc kodek se využívá pro digitální vysílání DVB-T2.
- SMPTE VC-1 (WM9) - je specifikace video kodeku, která byla standardizována společností SMPTE (Society of Motion Picture and Television Engineers). Tento kodek byl implementován ve Windows Media 9 (WM-9). Má podobné vlastnosti jako MPEG-4, ale umožňuje hladší integraci s počítači nebo s hybridními PC-TV zařízeními. [38]

6.2.4 IPTV komunikační model a protokoly

IPTV komunikační model se skládá ze 7 konceptuálních vrstev (a jedné volitelné). Komunikační proces začíná s elementárním proudem MPEG, který je výstupem kodéru. Na vstupu kodéru může být analogové nebo digitální video. Jestliže se jedná o analogový signál, tak ten je pomocí vzorkování, kvantizace a komprese převeden do digitální podoby. V případě, kdy přichází na vstup digitalizovaný signál, může být tento signál převeden pomocí vhodné kompresní metody (MPEG-2, MPEG-4 part 10(H.264), WM9) do jiného formátu.

Výstupní elementární tok MPEG obsahuje informace: typ rámce a rychlost, umístění datových bloků na obrazovce, poměr stran. Celkem mohou být přenášeny 3 typy médií (video, audio, data - informace o programech). Každé video, audio, datový elementární tok je rozdělen pomocí paketizace do kratších dílčích bloků, tím vznikají paketové elementární datové toky PES (Packetized Elementary Stream). Každý PES stream obsahuje jeden typ dat z jednoho zdroje. PES paket může mít pevnou (nebo proměnnou) délku až 65536 bajtů. Poté jsou PES pakety sdružovány do transportního datového toku TS (Transport Stream). TS transportní tok je tvořen TS pakety o pevné délce 188 bajtů (záhlaví 5 bajtů, 183 užitečná data). Každý TS paket



Obrázek 38: IPTV komunikační model.[39]

obsahuje jeden ze tří formátů médií (video, zvuk, data). Ve výsledném transportním toku TS jsou multiplexovány všechny elementární toky. Dále je vzniklý transportní tok předán spodním vrstvám, kde dochází k dalšímu zapouzdření přenášeného obsahu. Tyto 4 vrstvy se postarají o doručení IPTV obsahu až k cíli.

Pro streamování videa v reálném čase je využit protokol RTP (Real-time Transmission Protocol), který využívá UDP (User Datagram Protocol). V případě VoD přenosu je využíván protokol RTSP (Real-time Transmission Streaming Protocol) přes TCP transportní protokol. [39]

- **MPEG-TS** - původně navrhnutý pro MPEG-2 proudy (streamy), ale taky se využívá pro MPEG-4 nebo WM9 proudy. Hlavní práce TS (Transport Stream) je multiplexování video a audio proudů a synchronizace přijímače. Každý PES paket je formován do TS paketů s pevnou velikostí. Výsledný transportní proud se skládá ze sekvence paketů o pevné délce 188 bajtů. Každý TS paket je tvořen 184 bajty užitečných dat a 4 bajty tvořící hlavičku paketu. Jednou z položek v této hlavičce je 13 bitový paketový identifikátor (PID), který hraje klíčovou roli při provozu TS. Pro audio pakety je přiřazen PID identifikátor s hodnotou 64 a pro video pakety je využita hodnota 51. Ve finálním toku nejsou oba typy paketů rozprostřeny rovnoměrně. Nejsou-li v multiplexoru žádné pakety, vloží nulové pakety (označené hodnotou PID 0x1FFF) pro zachování přenosové rychlosti. Multiplexor také nesynchronizuje dva PES toky. Pro synchronizaci obou toků je proto vyžadován samostatný proces. [38] [52]
- **RTP (Real-time Transport Protocol)** - je primárním standardem pro streamování dat v IP sítích v reálném čase. Vzhledem k povaze real-time protokolu se obvykle využívá pro audio/ video aplikace v IPTV a VoIP. Tyto aplikace mohou často tolerovat ztrátu

některých paketů, jelikož je hlavně upřednostňováno, aby stream probíhal co nejvíce v reálném čase. Na rozdíl od aplikací, které nemohou nikdy ztratit balíček, jako je například komunikace v databázích, jsou aplikace RTP speciální kategorií, kdy příležitostná ztráta datového paketu nebude způsobovat katastrofální škody. Uživatelé audio/video aplikací si většinou ani ztráty nevšimnou, nebo mohou snadno tolerovat jakoukoliv přerušovanou a malou degradaci ve kvalitě zvuku nebo videa. [47]

- **RTCP (RTP Control Protocol)** - doplňuje protokol RTP. RTCP poskytuje statistiky a řídicí informace. Jeho úkolem je poskytovat informace o kvalitě datového toku RTP, ale nepodílí se na přenosu jakýchkoliv dat streamu. Přenos dat streamu je práce pro RTP protokol, zatímco řízení tohoto přenosu je v režii protokolu RTCP. Shromažďováním statistik, jako jsou celkové odeslané bajty, odeslané celkové pakety, počet ztracených paketů, jitter (kolísání zpoždění), časové zpoždění, zpětná vazba a další, poskytuje RTCP informace serverovým a klientským aplikacím, které mohou být použity ke zlepšení kvality služeb. [47]
- **RTSP (Real Time Streaming Protocol)** - je síťový řídicí protokol určený pro řízení streamingových mediálních serverů. Protokol se používá pro vytváření a řízení mediálních relací mezi koncovými body. Klienti vydávají příkazy serverům ve stylu VHS, jako je přehrávání, přetáčení a pozastavení, které usnadňují řízení toku v reálném čase ze serveru na klienta (Video On Demand). Přenos samotných datových proudů není úkol RTSP. Většina serverů RTSP využívá protokol Real-time Transport Protocol (RTP) ve spojení s protokolem Real-Time Control Protocol (RTCP) pro poskytování datového toku. Nosičem tohoto protokolu je protokol TCP. [47]
- **UDP (User Datagram Protocol)** - je protokol transportní vrstvy, který je označován často jako nespolehlivý oproti protokolu TCP. Na druhou stranu protokol UDP poskytuje rychlé a efektivní přenosové služby síťové vrstvy (IP protokolu). Navíc UDP protokol nenavozuje přímé spojení mezi komunikujícími stranami. Odesílací strana se nestará o to, jestli byl paket doručen v pořádku. UDP protokol se využívá ve většině real-time přenosech v IPTV a VoIP, jelikož se přenáší velký objem dat a jejich potvrzování by bylo pro síť velmi náročné. [50]
- **TCP (Transmission Control Protocol)** - je spojově orientovaný protokol, který garantuje spolehlivé doručování a navíc i ve správném pořadí. TCP protokol je vhodný pro aplikace, které vyžadují úspěšné doručení dat bez požadavků na zpoždění, ztrátovost, přenosovou rychlost a kolísání zpoždění. Vzhledem k tomu, že každý paket musí být potvrzován a někdy i znovu zaslán, není TCP protokol pro IPTV a VoIP vhodný. I když je UDP často považován za standardní přenosový protokol pro streamování videa, TCP je často používán pro službu VoD, která je provozována v unicast režimu. [51] [38]

- **IGMP (Internet Group Management Protocol)** - je protokol, který rozšiřuje požadavky na implementaci protokolu IP (IPv4) o podporu IP multicastu a umožňuje klientům se přihlásit k multicastovým skupinám prostřednictvím zasílání zpráv o členství. Přístupové směrovače užívají tyto zprávy ke zjištění, kteří uživatelé mají zájem o určitou multicastovou skupinu (televizní kanál) a také pomáhají zjistit, zda mají být předány pakety z určité multicastové skupiny a na které porty routeru. Protokol IGMP v kombinaci s multicastovými sítěmi byl navržen tak, aby efektivně využil dostupnou šířku pásma při přístupu, který může současně obsloužit pouze omezený počet kanálů IPTV. Multicast provoz používá speciální sadu IP adres v rozmezí 224.0.0.0 až 239.255.255.255. Každá adresa je přidružena k televiznímu kanálu. [38]
- **IP (Internet protocol)** - je protokolem síťové vrstvy, který se hojně využívá v počítačových sítích a hlavně v Internetu. Zejména se stará o přenos datových paketů (IP datagramy) přes mezilehlé směrovače (IP síť) až ke konkrétnímu cíli. Každému hostiteli v síti je přidělena určitá IP adresa a každý paket obsahuje řídicí data a uživatelská data. V řídicích datech jsou právě obsaženy IP adresy zdroje a cíle, na základě kterých směrování probíhá. V současné době se stále využívá verze IPv4, ale už se pomalu přechází na verzi IPv6. [49]

6.3 VoIP

Další službou poskytovanou v rámci balíčku Triple play je VoIP (Voice over IP). Jedná se o přenos hlasových paketů po datové síti pomocí protokolu IP.

Dříve byl hlas přenášén po PSTN (Public Switched Telephone Network) sítí, která fungovala na principu přepojování okruhů. Tato technika byla ovšem poněkud neefektivní, jelikož pro každý hovor byl vytvořen okruh, který nemohl být využíván nikým jiným, dokud hovor neskončil. Tímto způsobem docházelo ke spotřebě přenosové kapacity, za kterou si její provozovatel nechával adekvátně zaplatit.

S rozvojem datových sítí se tedy mění i princip přenosu hlasu. Princip VoIP spočívá v tom, že lidský hlas, který je zaznamenán mikrofonom, je z analogové podoby převeden do paketové podoby. Tyhle hlasové pakety jsou dále šířeny prostřednictvím datové sítě, která využívá protokol IP. VoIP služba by neměla být omezena jen na hovory mezi VoIP telefony, ale měla by podporovat i hovory do odlišných sítí, například ISDN, POTS a GSM. Pro tyto účely slouží brány, které převádějí signál například z paketů na digitální signál nebo na spojitý analogový signál.

Přenos hlasu po datové síti je dost citlivý na zpoždění a jitter (kolísání zpoždění). Parametr jitter je proměnlivý a jeho hodnota závisí například na zpoždění při zpracování, zdržení paketu ve frontě a na využití různých přenosových tras. Na druhou stranu VoIP není moc citlivé na eventuální výpadky a ztráty některých dat v rozumné míře, které lidské ucho někdy ani nemusí postrehnout, avšak důležité je, aby hovor zůstal srozumitelný. Co se týče zpoždění, mělo by se pohybovat v rozmezí 20-40 ms. V ideálních podmínkách se uvažuje hodnota 6 μ s na jeden

kilometr. V tabulce č. 12 jsou uvedeny rozsahy zpoždění pro přenos hlasu, které jsou definovány v doporučení ITU-T G.144.[54][55]

Tabulka 12: Klasifikace zpoždění pro přenos hlasu po datové síti.[39]

Rozsah zpoždění [ms]	Popis
0-150	Vyhovující zpoždění
150-400	Příjemné zpoždění
>400	Nepříjemné zpoždění

VoIP přináší následující výhody:

- Snížení nákladů - volání přes datové sítě je umožněno prakticky z kteréhokoli místa. Jedinou podmínkou je akorát přístup k internetovému připojení. V dnešní době je možné se bezplatně připojit k Internetu v každém nákupním centru, letišti nebo v různých budovách.
- Zvýhodněné ceny - pokud jsou hovory uskutečněny v rámci sítě stejného poskytovatele, tak tyto hovory nejsou zpoplatněny, a tudíž jsou zdarma. V případě volání na čísla mobilních operátorů, pevné linky či do zahraničí je tato služba už zpoplatněna. Jejich cena se většinou odvíjí na výši předplaceného kreditu a platí, čím vyšší předplacený kredit, tím menší cena za minutu.
- Zabezpečení - je možno nastavit zabezpečení hlavičky paketu obsahující řídicí informace jako cílovou, zdrojovou adresu. Druhou variantou je zabezpečit jen tělo paketu obsahující vlastní přenášená data. Dále je i možno zabezpečit obě části paketu současně. [54]

6.3.1 Kódování hlasu a použité kodeky

Přenos digitálního signálu zahrnuje dva kroky. Prvním krokem je vzorkování. Jedná se o proces, kdy je analogový signál získaný mikrofonom převeden na sekvenci diskrétních vzorků. Druhým krokem je již kódování, které přiřazuje každému vzorku symbol z konečné abecedy. Nejčastějším symbolem je bitové slovo. Výsledkem obou operací je bitový tok, který je formován do paketu. Navíc při paketovém přenosu hlasu je využívána proměnlivá bitová rychlost kodeku, jelikož kodek generuje data jen když uživatelé mluví, ale ve chvílích, kdy zrovna uživatelé nemluví, nejsou generována žádná data. Aby byla vzorkovací frekvence efektivní, musí být co nejnižší, ale zároveň nesmí být ohrožena kvalita toku. Pro vzorkovací frekvenci byla v hlasových aplikacích vybrána hodnota 8 kHz. Další věc, která ovlivňuje délku toku je počet bitů generovaných pro každý vzorek, který by měl být co možná nejnižší. Při vzorkování a kódování hlasu je využíváno toho, jak je zvuk vnímán našimi sluchovými orgány a jak je hlas generován. Dalším bodem, který je třeba vzít v úvahu, je požadovaná kvalita hlasu pro telefonní aplikace. Uživatelé chtějí čistý a snadně srozumitelný hlas. Prioritou tedy bude hlavně porozumět hlasové zprávě a identifikovat osobu na základě přenášeného signálu, ale jiné funkce, jako je vysoká přesnost a stereofonní zvuk nebudou nárokovány. [38] Pro kódování hlasu jsou využívány následující kodeky:

- **G.711** - standard běžně označován jako pulzně kódová modulace PCM (Pulse Code Modulation). PCM přiřazuje každému vzorku signálu číslo reprezentované binárním slovem. Kodek využívá pro svou činnost vzorkovací frekvenci 8 kHz a každému hlasovému vzorku je přiřazeno 8-mi bitové slovo (256 kvantizačních rovin), tudíž výsledná bitová rychlost toku odpovídá hodnotě 64 kbit/s. V současné době existují kodeky, které vycházejí ze standardu G.711, přesněji se jedná o G.711.0 a G.711.1. Ten první poskytuje bezztrátovou kompresi. Druhá možnost umožňuje vzorkovací frekvenci 16 kHz a vyšší kvalitu zvuku. Výsledný tok je potom 64, 80, 96 kbit/s. Kodeky pracující se standardem G.711 využívají dvě sady koprimace v závislosti, kde na světě jsou využívány. Pro Severní Ameriku a Japonsko je využívána kompresní sada μ law. Pro Evropu je využívána kompresní sada A law. [54]
- **G.723** - v dnešní době se jedná o nevyužívaný kodek, který má velmi nízké požadavky na šířku pásma. V roce 1990 byl nahrazen standardem G.726. Kodek pracoval s přenosovými rychlostmi 24 kb/s a 40 kb/s při využití adaptivní rozdílové pulzně kódové modulace ADPCM (Adaptive Differential Pulse Code Modulation). Ve variantě G.723.1, která se stále využívá, se pracuje s bitovými toky 5,3 a 6,3 kbit/s využívající 2 rozdílné algoritmy. Pro bitový tok 6,3 kbit/s je aplikován algoritmus MPC-MLQ a pro tok 5,3 kbit/s je využíván algoritmus ACELP. G.723.1 se využívá pro přenos hlasu v rámci normy H.324. [54]
- **G.726** - tento standard je náhradou za standard G.723, ze kterého si zachovává ADPCM modulaci. ADPCM přenáší rozdíl mezi příchodím vzorkem a predikcí (odhad), získanou na základě starších vzorků signálu. Často bývá využívána rychlost toku 32 kbit/s, což je jen polovina rychlosti toku využívaného u standardu G.711. Celkově standard pracuje s rychlostmi 40, 32, 24 a 16 kbit/s. [54]
- **G.729** - standard je založen na algoritmu CS-ACELP, jehož princip spočívá ve vytváření tzv. knihy kódů. Do knihy kódů se ukládají často využívaná spojení samohlásek nebo souhlásek. Při dalším přenosu stejného spojení se jen posílá odkaz na tuto knihu, která se vytváří dynamicky v průběhu hovoru. Nevýhoda tohoto standardu spočívá v tom, že hledání odkazu ve velké knize kódů způsobuje zpoždění. G.729 poskytuje přenosovou rychlost 8 kbit/s, kterou lze snížit až na 6,4 kbit/s, ale na úkor hlasové kvality. Navíc standard obsahuje funkci VAD (Voice Activity Detection), která na základě detekce kvality hlasu pozná, jestli účastník hovoří či ne. V případě, kdy účastník nehovoří, zastaví se přenos, který by byl zbytečný, neboť by obsahoval jen šum. [54]

6.3.2 Standardy a protokoly

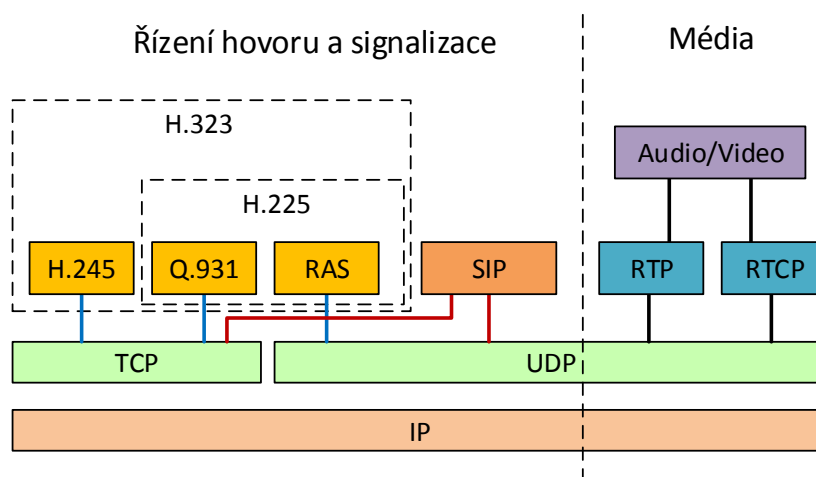
Ke specifikaci VoIP protokolů existují dva následující rozdílné standardy:

- **H.323** - ve skutečnosti se jedná o sadu protokolů, které jsou určeny jak pro telefony, tak i pro videopřenosy.

Tabulka 13: Přehled standardů pro kódování hlasu.[54]

Standard	Šířka pásma [bit/s]	Velikost vzorku [B]	MOS
G.711	64	80	4,1
G.723.1	6,3	24	3,9
G.723.1	5,3	20	3,8
G.726	24	15	3,62
G.726	36	20	3,85
G.729	8	10	3,92

- **SIP (Session Initiation Protocol)** - jedná se signalizační protokol pro vytvoření a řízení spojení mezi účastníky.



Obrázek 39: H.323 a SIP protokoly).[60]

6.3.2.1 H.323

Jedná se o standard ITU-T, který je určen pro přenos multimediálních dat, takže je možné jej využít pro VoIP komunikaci nebo i pro videokonferenci. Ve srovnání s protokolem SIP se jedná o složitější variantu pro VoIP spojení. Standard H.323 umožňuje propojení s veřejnou telefonní sítí PSTN za pomoci tzv. VoIP brán. Pakety hlasu/video jsou přenášeny pomocí protokolu RTP. Spolu s protokolem RTP se využívá i protokol RTCP, který přenáší stavové a řídicí informace. Všechna signalizace (kromě RAS) je přenášena pomocí TCP. RAS je tedy přenášen přes UDP. [59]

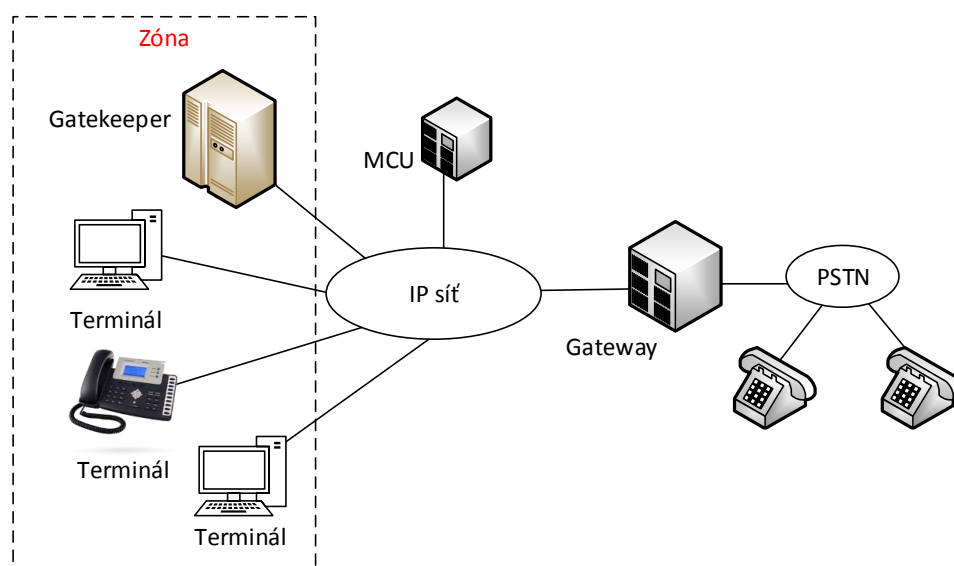
Standard H.323 zahrnuje následující signalizační protokoly:

- **H.245** - jedná se o protokol řízení médií (media control). Zahrnuje procedury pro vyjednávání kodeků a portů pro RTP toky (pro každý směr zvlášť).

- **H.225/RAS (Registration, Admission and Status)** - protokol řídí registraci, přístup, stav. Jedná se o komunikační protokol Gatekeepera. Při komunikaci jakéhokoli zařízení (brána, terminál, další Gatekeeper) s Gatekeeperem se využívá RAS zpráv.
- **H.225/Q.931** - protokol pro signalizaci volání. Obsahuje zprávy pro inicializaci i ukončení spojení (SETUP, ALERTING, CONNECT, RELEASE COMPLETE, atd.). Q.931 je zahrnut v protokolu H.225. [59] [55]

Architektura H.323 standardu zahrnuje 4 logické komponenty:

- **Terminál** - koncové zařízení (VoIP telefon, analogový telefon, softwarový telefon v PC)
- **MCU (Multipoint Control Unit)** - řeší komunikaci více uzlů. Například se uplatňuje při konferenci mezi 3 nebo více terminály. Jedná se o nepovinnou část H.323 architektury.
- **Gatekeeper** - neboli správce. Gatekeeper se využívá pro směrování volání, jelikož koncové zařízení nezná umístění volaného. Pomocí něj dochází jen k prvotnímu navázání spojení a poté již následná komunikace probíhá přímo mezi terminály.
- **Gateway** - jedná se o bránu, která tvoří rozhraní mezi PSTN a Internetem. Má za úkol převádět signál z jednoho systému do druhého. [59]



Obrázek 40: Komponenty H.323.[57]

6.3.2.2 SIP

Jedná se o modernější řešení využívané pro VoIP komunikaci. SIP protokol je vyvíjen pracovní skupinou Internet Engineering Task Force (IETF). Navíc je odvozen z protokolu **HTTP** (Hypertext Transfer Protocol) a protokolu SMTP (Simple Mail Transfer Protocol). SIP nemusí jen obstarávat telefonování, například může posloužit pro službu tzv. instant messagingu (výměna zpráv a souborů). Oproti H.323, které bylo robustní, je SIP odlehčený a menší. Celý proces spojení je jednodušší a tím je i rychlejší, proto většina zařízení využívá právě SIP. SIP je ve skutečnosti řídicí protokol aplikační vrstvy.

Pro identifikaci uživatelů SIP se využívá tzv. **SIP URI** (Uniform Resource Identifier), což je telefonní číslo SIP uživatele, které je podobné e-mailové adrese. SIP URI se zapisuje ve tvaru `jmeno_uzivatele@hostitel`. První část se skládá ze jména nebo unikátního čísla. Druhá část, která je oddělena symbolem @, může být tvořena IP adresou uživatele, nebo serverem poskytovatele (SIP doména). Příklady jednotlivých SIP URI:

sip:karel45@212.188.3.218

sip:krupik@cesnet.cz

sip:245596255@cesnet.cz

Stejně jako H.323, tak i SIP pracuje s protokoly **RTP/RTCP**, kde RTP přenáší audiovizuální data a RTCP shromažďuje statistiky přenosu. V SIP zprávě jsou zapouzdřeny informace **SDP** protokolu (Session Description Protocol). Tyto informace protokolu SDP specifikují způsob kódování multimediálních dat, čísla portů pro RTP přenos atd. Z názvu (Session Initial Protocol) je již patrné, že protokol provádí jen navazování relací. Zjednodušeně lze tvrdit, že protokol udělá vše potřebné, aby se obě strany našly. Když se poté obě strany najdou, tak už protokol SIP není potřeba a vše potřebné řeší už jen mezi sebou. Toto chování je velice odlišné od H.323, který se snažil dohlížet nad celou komunikací a bez Gatekeeperu by ani spojení nebylo sestaveno. U SIPu nastávají dvě možnosti. Pokud volající zná polohu volaného (síťovou adresu) mohou se terminály spojit přímo. Ve druhém případě, když volající nezná polohu volaného, tak využívá funkci specializovaných serverů (analogie gatekeeperu u H.323). Servery mají tedy za úkol zprostředkovat kontakt mezi volajícím a volaným. [57][59]

SIP architektura

SIP architektura je tvořena prvky:

- **Registrar server** - přijímá požadavky na registraci, tudíž registruje jednotlivé koncové terminály. V rámci registrace dochází ke svázání identity uživatele (SIP adresa) s místem umístění koncového terminálu (IP adresa). Tyto informace jsou ukládány do databáze na Location server.
- **Location server** - obsahuje informace o umístění jednotlivých uživatelů (terminálů) a SIP Proxies. Informace zde vkládá Registrar server. Tyto údaje poté slouží pro směrování v IP síti.
- **Redirect server** - slouží pro přesměrování v síti, uplatňuje se v případě, pokud volající nezná IP adresu serveru, u kterého se volaný nachází. Server vrací požadovanou adresu zpět koncovému uživateli. Následně je nová adresa serveru kontaktována klientem.
- **Proxy server** - přijímá žádosti o spojení od jednotlivých klientů a následně je pomáhá směřovat k volanému. V případě pokud je volaný registrován na tomto serveru (pod stejnou doménou), přeposílá požadavek přímo k volanému. Poloha (IP adresa) uživatele je zjištěna pomocí Location serveru. Také se může stát, že volaný je registrován pod jiným serverem, tudíž je požadavek směřován k jinému Proxy serveru. K nalezení správného Proxy serveru pro next hop slouží vyhledávání v DNS nebo také statické záznamy.
- **User agent (Uživatelský agent)** - nejčastěji jsou koncové terminály označovány jako user agents UA, ale i Proxy server může být UA. SIP UA tedy mohou být IP telefony, Smartphones, PSTN brány, Proxy server atd. Každý UA se skládá z UAC a UAS. UA Client (UAC) je část, která vysílá požadavky a přijímá odpovědi. Například, když volající vysílá požadavek INVITE a čeká na odpověď. UAS (UA Server) se chová přesně opačně, respektive přijímá požadavky a odesílá odpověď. Příkladem může být volaný, který přijímá zprávu INVITE a odesílá odpověď. [59][56]

SIP zprávy

Funkce protokolu SIP je založena na výměně jednoduchých **SIP zpráv**, které se skládají ze žádostí (Method) a odpovědí (Response). Žádostí SIP protokolu mohou být následující:

- **REGISTER** - žádost o registraci. V tomto procesu dochází ke svázání jmenovité adresy uživatele s adresou zařízení (IP adresa).
- **INVITE** - žádost o spojení, která se vysílá při zahájení spojení. Je vysílána přímo volanému nebo je směřována přes Proxy server.

- **ACK** - metoda, která potvrzuje sestavení spojení.
- **CANCEL** - slouží ke zrušení sestavovaného spojení. Pokud se volající rozhodne zrušit spojení ještě před tím, než protistrana potvrdí žádost INVITE, využívá se právě této metody CANCEL.
- **BYE** - žádost o ukončení spojení
- **OPTIONS** - žádost pro získání informací o schopnostech protistrany (podporované zprávy, kodeky, typy médií). [59][?]

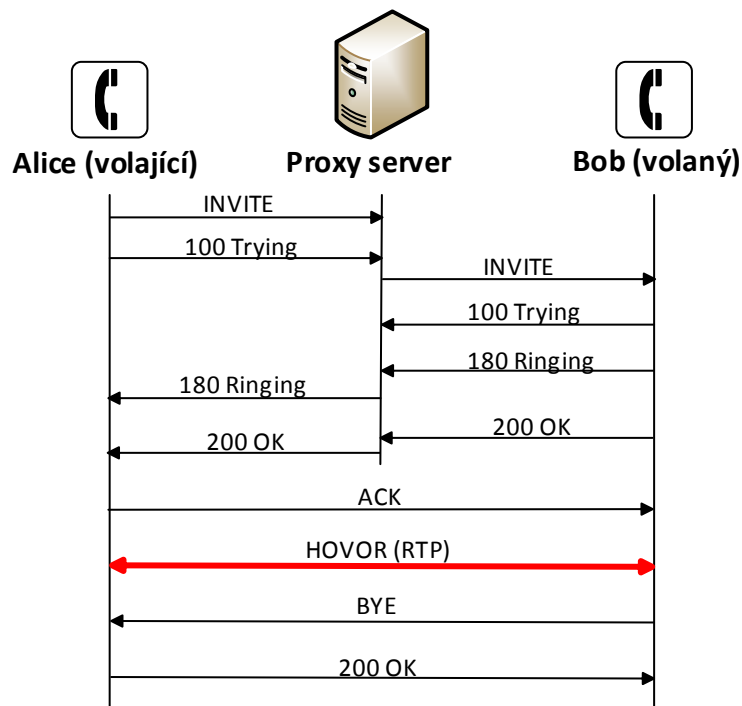
Na každou žádost SIP protokolu následuje odpověď (kromě metody ACK). Odpovědi vycházejí z HTTP (Hypertext Transfer Protocol) protokolu. Jednotlivé odpovědi jsou reprezentovány číselným označením s textovým popisem, například 100 - Trying, 200 - OK, 180 - Ringing atd. Celkem existuje 6 tříd odpovědí. Odpovědi jsou rozděleny do těchto kategorií:

- **1XX (průběh)** - vzdálená strana informuje o průběhu zpracování žádosti.
- **2XX (úspěch)** - znamená úspěšné provedení žádosti
- **3XX (přesměrování)** - obsahuje informaci kam přesměrovat žádost
- **4XX (chyba klienta)** - chyba způsobena klientem. Žádost je v nesprávném formátu nebo žádost nemůže být zpracována na tomto serveru, ale jiném může být úspěšně zpracována.
- **5XX (chyba serveru)** - problém na straně serveru. Formát žádosti je v pořádku, ale server není schopen ji obsloužit.
- **6XX (fatální chyba)** - nastává, když žádost nemůže být splněna na žádném jiném serveru.[56]

Na obrázku č.41 je zobrazen příklad průběhu SIP signalizace. Nejdříve Alice (volající) vysílá požadavek na sestavení hovoru (INVITE), který je předán Proxy serverem Bobovi (volaný). Poté následuje zpráva 180 RINGING, která informuje o tom, že Bobův telefon vyzvání. Jakmile Bob přijme hovor, odešle se zpráva 200 OK. Po přijetí této zprávy volající stranou přichází zpráva ACK, která signalizuje, že ALICE obdržela finální odpověď na předchozí žádost INVITE. Po zprávě ACK, je mezi Alicí a Bobem vytvořeno spojení přenášející hlasové pakety, které jsou zapouzdřeny v RTP protokolu. Poté Bob zavěšuje telefon a následně je vyslána Bobovým UA žádost BYE. Jakmile je přijata finální odpověď 200 OK na žádost BYE, je hovor ukončen.

6.3.3 Hodnocení kvality hovoru ve VoIP

Celkovou kvalitu hlasového signálu ve VoIP ovlivňuje řada faktorů, například zpoždění, kolísání zpoždění (jitter), ztráta paketů, posloupnost paketů, kodek a ozvěna (echo). Pro vyjádření této



Obrázek 41: Časový diagram SIP zpráv.[59]

celkové kvality hlasového signálu se využívá parametr **MOS** (Mean Opinion Score). Přesněji se jedná o stupnici MOS, pomocí které subjekty vyjadřují kvalitu hlasu. MOS je pětibodová stupnice s rozsahem 1 - 5, kde hodnota 5 vyjadřuje nejlepší kvalitu a hodnota 1 nejhorší kvalitu. Každému číslu ze stupnice odpovídá slovní kvalitativní ohodnocení, které je přesně definované (viz tabulka č.15). [59]

Existuje několik druhů MOS, které se liší na základě toho, jaký typ testu spolu s metodou byl využit pro získání hodnoty. Pro posouzení kvality hovoru rozlišujeme dva typy testů.

- Poslechové testy (L - Listening)- testy, které se v rámci hodnocení kvality zabývají jen tím, co uživatel slyší během volání.
- Konverzační testy (C - Conversational) - testy zaměřující se na celkovou kvalitu volání mezi dvěma účastníky. Zahrnuje kvalitu poslechu, ale i schopnost konverzace. Například je zde i zohledněno, jestli na sebe jednotlivé části konverzace navazují. [61]

Pro stanovení **MOS** rozlišujeme 3 základní metody:

- **subjektivní metody (S - Subjective)** - daný vzorek hlasu je ohodnocen širokou skupinou lidí a celková kvalita vzorku je potom statisticky vyhodnocena na základě hodnocení subjektů. Pro nahrávání řečových vzorků musí být splněny specifické pravidla definované v doporučení ITU-T P.800. V doporučení je uvedeno, jakým způsobem mají být vybírání respondenti a také jsou zde definovány jednotlivé metody. Tyto metody jsou velice přesné

a výsledky lze považovat za referenční hodnoty. Bohužel jsou časově a finančně náročné, proto se využívají jiné metody. Mezi subjektivní metody patří ACR, DCR, CCR. Právě nejčastěji využívaná je metoda ACR. Principem této metody je, že uživatel hodnotí každou nahrávku s hlasem pomocí stupnice MOS hodnotou od 1 do 5. V případě metody DCR, která je upravenou metodou ACR, se porovnává originální hlasový signál a degradovaný signál, který prošel systémem. Na základě porovnání obou signálů se hodnotí MOS. Zatímco u metody DCR byly vzorky (originální (A) a degradovaný (B)) pouštěny v pevně daném pořadí (první A a potom B), tak u metody CCR je tohle pořadí náhodné (např. první B a potom A). [61][63]

- **objektivní metody (O - Objective)** - rozdělujeme na intrusivní a neintrusivní. Intrusivní metody pomocí matematického algoritmu porovnávají původní (referenční) a přenesený vzorek. Využívaný algoritmus se snaží předpovídat subjektivní hodnocení hlasového signálu. Metody nejsou sice tak přesné jako v případě subjektivních metod, ale jejich vyhodnocení není tak časově náročné a lze je využívat pro automatizované měření. Mezi intrusivní metody patří PAMS, PSQM, PESQ. Neintrusivní metody se liší oproti intrusivním metodám v tom, že nemají k dispozici původní (referenční) signál. Příkladem mohou být metody LCQA, ANIQUE, 3SQM. Tyto metody lze použít pro sledování provozu v reálném čase na přijímací straně. Na druhou stranu jsou výsledky o něco horší. [61]
- **odhadem (E - Estimate)** - pracují s přístupem, kdy kvalita je odhadována pouze na základě síťových parametrů přenosového řetězce. Takovým nejznámějším zástupcem je E-model, který je popsán níže. [63]

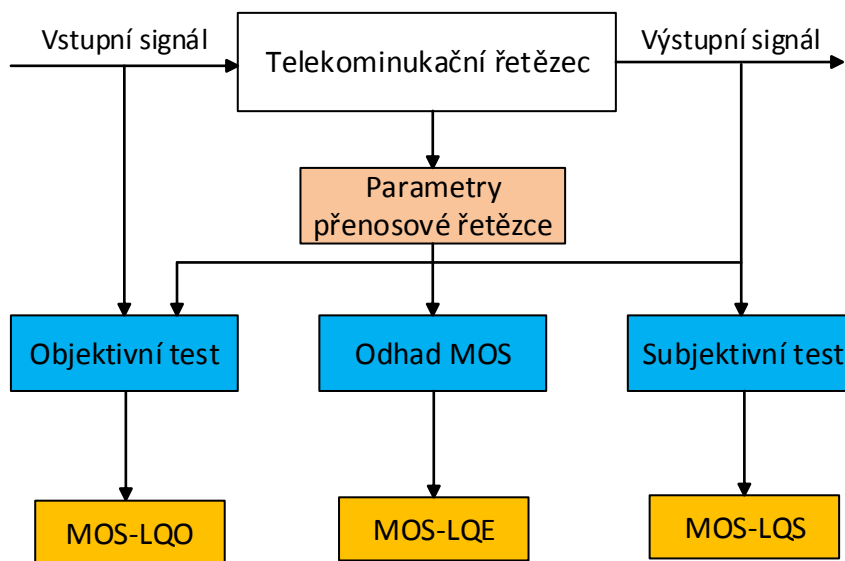
Při kombinaci uvedených metod a testů dostáváme různé druhy MOS, které jsou zobrazeny v tabulce č.14.[61]

Tabulka 14: Druhy MOS.[61]

MOS	Poslechový	Konverzační
Subjektivní	MOS-LQS	MOS-CQS
Objektivní	MOS-LQO	MOS-CQO
Odhadem	MOS-LQE	MOS-CQE

Tabulka 15: Stupnice MOS.[61]

MOS	Kvalita	Popis
5	Vynikající	Neznatelné rušení.
4	Dobrá	Rušení lze rozpoznat, ale není obtěžující.
3	Průměrná	Rušení lze rozpoznat a mírně obtěžuje.
2	Nízka	Rušení obtěžuje, je nutno vyvinout úsilí při snaze porozumět.
1	Špatná	Rušení velmi obtěžuje, řeč je nesrozumitelná.



Obrázek 42: Vztah mezi jednotlivými druhy MOS hodnocení.[59]

E-model

Jedná se o výpočetní model k odhadnutí kvality telefonního hovoru na základě velkého množství proměnných. E-model je specifikován v doporučení ITU-T G.107. Výstupem E-modelu je R faktor, který nabývá hodnoty od 0 do 100. Výslednou hodnotu R faktoru je možné přepočítat na hodnotu MOS. R faktor zohledňuje nejdůležitější jevy, které ovlivňují kvalitu hovoru během přenosu telekomunikačním řetězcem, například vliv šumu, hlasitosti, kvantizačního zkreslení, způsob kódování, ozvěny, zpoždění atd. Každému faktoru z rovnice č. 1 je přiřazena určitá hodnota, která může záviset na dalších podfaktorech. Ty faktory, které negativně ovlivňují kvalitu, se kumulují a odečítají se od základní hodnoty SNR (odstup signálu od šumu), poté k této hodnotě je připočtena hodnota faktoru zvýhodnění. Rovnice pro výpočet R faktoru má následující podobu:

$$R = R_0 - I_S - I_d - I_{e-eff} + A \quad (1)$$

R_0 - představuje úroveň odstupu signálu od šumu (SNR) zahrnující hluk v místnosti i rušení způsobené el. obvody.

I_S - simultánní faktor rušení. Rušení působící souběžně s vlastním hlasovým signálem.

I_d - faktor zpoždění zahrnuje všechny druhy zpoždění (i zpoždění ozvěn).

I_{e-eff} - představuje efektivní faktor zařízení. Faktor zahrnuje vliv použitého kodeku (I_e) a ztrátovost.

A - faktor zvýhodnění, který závisí na soustředěnosti posluchače. [62]

R	Spokojenost uživatelů	MOS
100	Velmi spokojeni	4,3
90	Spokojeni	
80	Někteří uživatelé nespokojeni	4,0
70	Mnoho uživatelů je nespokojených	3,6
60	Skoro všichni jsou nespokojeni	3,1
50	Není doporučováno	2,6
0		1

Obrázek 43: Vzájemný vztah mezi R faktorem a stupnicí MOS.[59]

6.4 Datová služba

Poslední nabízenou službou v rámci Triple play je datová služba, která ve srovnání s ostatními službami má nejmenší prioritu. Datová služba nejčastěji poskytuje vysokorychlostní připojení k internetu, takže například umožňuje prohlížet webové stránky, přijímat a odesílat e-maily, nahrávat a stahovat různá data.

Přenos dat lze rozdělit na základě využití transportního protokolu (TCP, UDP). Nejčastěji se využívá transportní protokol TCP, který garantuje kromě samotného doručení i doručení paketů ve správném pořadí. Samotný protokol TCP byl popsán už výše. Nad protokolem TCP jsou nejčastěji využívány pro přenos dat aplikační protokoly jako FTP, SMTP, POP3, IMAP nebo HTTP. Protokol SMTP se využívá pro přenos e-mailových zpráv od klienta na server a také pro výměnu e-mailů mezi servery. Jednoduše řečeno, SMTP je využíván pro odesílání e-mailů z pohledu uživatele. V opačném směru, tedy pro přijímání e-mailů, je využíván protokol IMAP nebo POP3 (stahování e-mailů ze vzdáleného serveru na klienta). Protokoly HTTP a FTP jsou probrány detailněji níže. Jako druhá možnost se pro přenos využívá protokol UDP, který je vhodnější pro některé aplikace. Přesněji se jedná o aplikace, u kterých by nemělo smysl opakované doručování paketů nebo potvrzování všech paketů. Příkladem může být přenos televizního signálu. [54]

HTTP protokol

Hypertext Transfer Protocol je aplikační protokol, který slouží pro přenos hypertextových dokumentů mezi webovým serverem a klientem. V současné době umožňuje přenášet jakýkoli typ souboru (obrázek, video, audio) pomocí standardů MIME. Z tohoto důvodu se stal jedním z nejdůležitějších protokolů Internetu pro přenos dat. HTTP je bezstavový protokol fungující na principu požadavek/odpověď. To znamená, že protokol nerozpoznává klienty, tudíž neuchovává stav komunikace mezi serverem a klientem. Pro tyto účely slouží tzv. cookies. Protokol HTTP komunikuje na TCP portu 80. Samotný protokol HTTP je nezabezpečený, proto se většinou využívá šifrovaná varianta označovaná HTTPS (Hypertext Transfer Protocol Secure). HTTPS pro šifrování komunikace využívá protokol TLS (Transport Layer Security).[64]

FTP protokol

File Transfer Protocol (FTP) je jeden z nejstarších protokolů a slouží pro přenos souborů mezi dvěma počítači prostřednictvím počítačové sítě. Například pomocí FTP protokolu je možné nahrávat a stahovat soubory z disku umístěného na serveru, kde je pro tyto účely vymezen prostor. FTP vychází z architektury klient-server. Jeho použití je nezávislé na operačním systému. K FTP serveru se lze připojit nejméně dvěma způsoby, a to buď pomocí webového prohlížeče, nebo pomocí FTP klienta, který poskytuje rozšířené možnosti operací. FTP klient umožňuje operace se soubory a adresáři, jako jsou například kopírování, mazání, editace, přejmenování, nahrávání dat na server, stahování dat ze serveru. Komunikace v rámci FTP je nezabezpečená, proto vznikl rozšiřující protokol FTPS (FTP Secure), který zabezpečuje komunikaci pomocí TLS. FTP protokol pro svou funkci využívá porty TCP/21 a TCP/20. Port 21 slouží ke kontrole, tudíž je použit pro přenos příkazů. Většinou na portu 20 jsou poté přenášeny samotná data. FTP server může fungovat ve dvou módech.

- Aktivní mód - klient pošle serveru informaci, na jakém portu (20, větší než 1024) naslouchá a poté na tomto portu server vytvoří datové spojení. Pokud se klient připojuje z privátní sítě za použití NAT, nastává problém, neboť je jeho IP adresa překládána.
- Pasivní mód - u tohoto módu vytváří datové spojení klient. Pasivní mód není výchozí pro FTP, a proto pro přepnutí do pasivního módu klient zasílá příkaz PASV. V odpovědi na tento příkaz se nachází informace o portu, na kterém server bude naslouchat. [65]

7 Vybudování heterostrukturální sítě

První kapitola praktické části se věnuje vybudování heterostrukturální sítě, která je následně využita pro určitá měření. Sestavení sítě proběhlo v učebnách fakulty FEI Vysoké školy báňské v Ostravě. Jednalo se o učebny, které byly vybaveny potřebnými technologiemi. K vybudování požadované sítě bylo potřeba využít vybavení celkem čtyř učeben a to EB316, EB315, EB215 a EB211. Učebna EB316 je vybavena EPON technologií a serverem Abacus pro zprostředkování Triple Play služeb. Hned vedle učebny EB316 se nachází učebna EB315, ve které jsou umístěny vytvořené optické trasy. O patro níže se nachází učebna s označením EB215. Tato učebna disponuje technologií VDSL2 (VDSL2 DSLAM Zyxel IES-5005). Ve stejné učebně se nachází i ADSL DSLAM (ZyXEL IES-1000). Dále se zde nachází dva switche (ZyXEL XGS-4526, ZyXEL GS-1524) s multiplexorem a demultiplexorem. Na stejném patře se také vyskytuje učebna EB211, ve které je umístěn simulátor vedení Spirent DLS-6900, Telebyte 458-3SL a modem (ADSL2+, VDSL2).

7.1 Využití síťové komponenty topologie

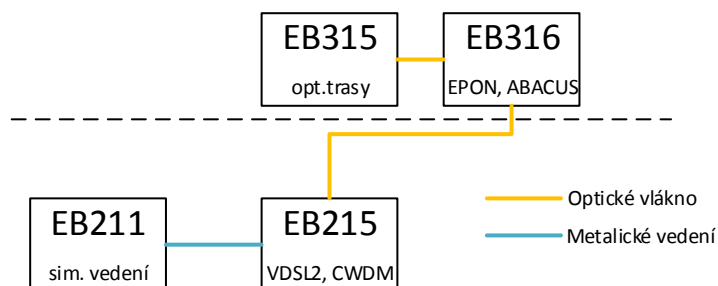
7.1.1 OLT jednotka Allied Telesis iMAP 9102

OLT centrální jednotka Allied Telesis iMAP 9102 je základním prvkem celé topologie. Skládá se ze čtyř slotů, z nichž tři jsou určeny pro instalaci různých modulů účastnických rozhraní a čtvrtý slot je určen pro řídicí modul pro správu jednotky. Využitá OLT jednotka je obsazena následujícími moduly:

- **TN-139-B** - modul poskytuje 20x 100BX Ethernet portů (FX20BX) pro připojení optického vlákna zakončené LC konektorem.
- **CFC12** - modul obsahuje CONSOLE port sloužící pro propojení s PC (konfigurace). Vedle konzolového portu se nachází MGMT port a 2x FastEthernet porty. Poslední 4 porty slouží pro připojení SFP modulů. K FastEthernet portu byly připojeny všechny tři servery přes switch.
- **TN-118-B** - GEAPON modul (EPON typ 2). Poskytuje optické rozhraní podle IEEE 802.3a. Vysílá na vlnové délce 1490 nm (výkon 2 dBm) a přijímá optický signál na vlnové délce 1310 nm s citlivostí přijímače -30 dBm.

7.1.1.1 Konfigurace OLT

Konfigurace OLT byla provedena pomocí příkazové řádky. Ke konfiguraci bylo využito PC, které bylo propojeno s CONSOLE portem u OLT pomocí serial kabelu RS - 232. Na PC byl využit program Putty, kde bylo nutno nastavit typ připojení SERIAL a správné hardwarové rozhraní. Po úspěšném připojení je nutné zadat přihlašovací údaje:



Obrázek 44: Schéma propojení učeben.

Username (uživatelské jméno): officer

Password (heslo): officer

Po připojení jsem nejprve nastavil IP adresu rozhraní 2.1 modulu EPON příkazem:

```
SET INTERFACE=2.1 EPON IP ADDRESS=192.168.0.15
```

Dále bylo nutno zaregistrovat připojené ONU jednotky ve formátu *CREATE ONU=<jméno ONU> ONUID=<ID ONU v rozsahu 0-31> INTERFACE=<číslo rozhraní EPON> MAC=<MAC adresa ONU>*. V mém případě to bylo:

```
CREATE ONU=ONU1 ONUID=4 INTERFACE=2.1 MAC= 00:15:77:43:A5:60
```

Správné zaregistrování ONU jednotky si lze ověřit a to příkazem *SHOW ONU*, kde by měla být jednotka ve stavu (state) UP-UP. V dalším kroku bylo nutné vytvořit VLAN, které jsem přiřadil k rozhraní 2.1.4 (ONU1):

```
CREATE VLAN=vlan300
```

```
ADD VLAN=vlan300 INTERFACE=2.1.4
```

Po vytvoření VLAN jsem vytvořil QoS profil, kterým je možno propouštět data maximální přenosovou rychlostí 100 Mb/s v obou směrech. Tento profil je následně přiřazen vytvořenému VLAN z předešlého příkazu.

```
CREATE QOSPOLICY=100Mbit MAXUPSTREAMRATE 100M MAXDOWNSTREAMRATE 100M
```

```
ADD QOSPOLICY=100Mbit INTERFACE=2.1.4 BIDIRECTIONAL VLAN=vlan300
```

Na závěr je potřeba nastavit multicast provoz:

```
ENABLE IGMP Snooping VLAN=VLAN300
SET IGMP Snooping FloodUnknowns ON
```

Pro výpis jednotlivých informací o OLT je velmi užitečné využít příkazy *SHOW INTERFACE* a *SHOW SYSTEM*.

7.1.2 ONU jednotka Allied Telesis AT-ON1000

Koncová GEPON ONU jednotka podporuje datové služby až do přenosové rychlosti 1 Gb/s přes pasivní optickou síť. ONU jednotka slouží pro převod optického signálu na elektrický, tudíž je vybavena optickým a ethernetovým portem. Pro připojení optické části sítě je zde SC/UPC konektor (PX20) a pro připojení klientského rozhraní (metalické části) slouží konektor RJ45 (10,100,1000Base-T LAN). Navíc ONU jednotka podporuje VLAN a DHCP, IGMP protokoly.



Obrázek 45: ONU jednotka Allied Telesis AT-ON1000).[13]

7.1.3 Pasivní optický dělič

Součástí topologie je i optický pasivní dělič 1 : 32. K dispozici je jen celkem 8 optických portů. Využívány byly jen porty č. 1 a 2.

7.1.4 ZyXEL IES-1000

Jedná se o DSLAM zařízení založeném na IP protokolu a slouží k propojení zákaznických jednotek s poskytovatelem služeb. Obsahuje 2 sloty pro DSL nebo VoIP linkové moduly pro poskytování ADSL2+, G.SHDSL a VoIP služeb. DSLAMy s IP technologií zajišťují vyšší efektivitu, vyšší přenosové rychlosti a lepší řízení. Například řeší složitost konverze datových formátů, řeší problém s přetížením sítě pomocí vysokorychlostního ethernetového přepínání. K dispozici jsou přenosové rychlosti od 128 Kb/s až do 24 Mb/s na vzdálenost až 6 km. DSLAM je využíván spolu s modulem ADSL2+ Annex B. Modul obsahuje splitter, jehož 12 portů je vyvedeno nad DSLAMem. [19]

Zařízení ZyXel IES-1000 je nakonfigurované jako switch, tudíž nebylo potřeba složitého nastavování. Jednotlivé přenosové profily zde byli již nastaveny dříve. V rámci této diplomové práce jsem využíval port 10, na kterém byla změřena přenosová rychlost 25,925 Mbit/s pro downstream a

1,380 Mbit/s pro upstream. Navíc se musela připojená zařízení pro správnou funkci nacházet v síti 10.0.0.0/8.

7.1.5 ZyXEL IES-5005

Zařízení ve skříňovém provedení obsahuje celkem 5 slotů. První slot je určen pro kartu zajišťující správu a přepínání. V mém případě tuto funkci zajišťovala karta MSC1000G obsahující 1x 10/100M MGMT rozhraní, 2 x 1000/100 ethernetové rozhraní, 4x SFP rozhraní a jedno konzolové rozhraní. Další 4 sloty slouží pro DSL karty ukončující linky. K těmto účelům byla využita karta VLC1224G, která je připojena ke 2. slotu. Tato karta funguje přímo jako 12 portový VDSL2 splitter. Jednotlivé porty mohou mít nastavené různé přenosové profily. Co se týče konfigurace zařízení, nebylo potřeba zasahovat. Přenosové profily byly už na zařízení nastaveny také již dříve a maximální přenosová rychlost byla změřena na portu číslo 12 a to 65 Mb/s ve vzestupném směru a 35 Mb/s ve směru sestupném.

7.1.6 Server ABACUS

Server od firmy Abacus obsahuje celkem 4 síťové karty s maximální přenosovou rychlostí 100 Mbps. Na serveru je nainstalován operační systém VMware, který rozděluje jeden fyzický server na 4 navzájem oddělené virtuální stroje (servery). Každému virtuálnímu serveru je přiřazeno jedno síťové rozhraní. Celkem tedy obsahuje 4 virtuální servery pro služby IPTV, VoIP a data. K serveru (virtuálnímu stroji) IPTV je přiřazen čtvrtý server pojmenovaný Beesmart Lite server. K serveru se přistupuje pomocí PC, které je připojeno k serveru ethernetovým kabelem. Navíc je nutno mít nainstalovaný na PC program VMware VSphere Client a také PC se musí nacházet ve stejné síti jako server Abacus. Přihlášení k serveru pomocí programu VMware VSphere Client je možné pomocí následujících přihlašovacích údajů:

- IP adresa serveru: 158.196.81.21
- Uživatelské jméno: root
- Heslo n311kat440

Po přihlášení k serveru pomocí VMware VSphere Client je umožněn přístup k jednotlivým serverům (virtuálním strojům), ke kterým je nutno se přihlašovat z účtu *officer* (heslo: *n311kat440*).

Nastavené adresy jednotlivých serverů:

Data: 10.1.4.10/8

VoIP: 10.1.4.20/8

IPTV: 10.1.4.30/8

7.1.6.1 Konfigurace služby IPTV

Pro služby streamování videa byl použit program VLC, který je možno nainstalovat z terminálu následujícími příkazy:

```
sudo apt-get update
sudo apt-get install vlc
```

Poté bylo důležité nastavit směrování na multicastové adresy následovně (na rozhraní eth0):

```
ip route add to 224.0.0.0/8 dev eth0
```

Nastavení streamu videa na straně serveru v programu VLC: V horní liště zvolíme možnost *Média* a po otevření nabídky zvolíme *Proud*. Po otevření okna tlačítkem *Přidat* vybereme soubor, který chceme streamovat. Po přidání videa klikneme na možnost *Proud*, dále volbou *Následující* se dostaneme k novému oknu, kde vybereme metodu *RTP/MPEG Transport Stream*. Poté pokračujeme tlačítkem *Přidat*. V novém okně do kolonky *Adresa* zadáme multicastovou adresu, na které se bude VLC stream vysílat. V případě této diplomové práce to bylo *224.1.1.1*. Nastavení portu necháme na *5004*. Dále možnost *Následující*, poté deaktivujeme klikem překódování a tím nás položka *Profil* nemusí zajímat. Nastavení streamování videa dokončíme pomocí voleb *Následující* a *Proud*.

Nastavení streamu na straně klienta: Stiskneme možnost *Média* a poté vybereme volbu *Otevřít síťový proud*. V novém okně zadáme multicastovou adresu, která byla zadána na straně serveru (*rtp://@224.1.1.1.5004*). Vše dokončíme stisknutím tlačítka *Přehrát*.

7.1.6.2 Konfigurace služby Data

Pro datovou službu je využíván webový server **Apache HTTP server**, prostřednictvím kterého je možné stahovat a nahrávat data. Připojení k serveru lze provést zadáním adresy (10.1.4.10) do webového prohlížeče (Mozilla Firefox).

7.1.6.3 Konfigurace služby VoIP

Pro služby VoIP byl použit open source software Asterisk, který umožňuje využít PC jako telefonní pobočkovou ústřednu (PBX). **Nastavení na straně serveru:** Instalace Asterisku pomocí příkazové řádky:

```
apt-get update
apt-get install asterisk
```

Při instalaci zadáme naši telefonní předvolbu (420). Konfigurace Asterisku se provádí editací dvou souborů (sip.conf, extension.conf). Soubor sip.conf slouží pro registraci, autentizaci a konfiguraci jednotlivých uživatelských účtů (SIP zařízení). Výpis ze souboru je možné zobrazit pomocí příkazu `nano /etc/asterisk/sip.conf`. Obsah souboru sip.conf:

```
[general]
port=5060
allow=all
binaddr=0.0.0.0

// registrace uživatele(SIP zařízení)
[1000]      // SIP účet
callerid=1000 // ID uživatele
type=friend  // obousměrné volání
context=remote // kontext pro příchozí hovory
host=dynamic // telefony nemají pevnou adresu
secret=1000  // heslo

[2000]
callerid=2000
type=friend
context=remote
host=dynamic
secret=2000
```

Pro číslovací plán ústředny slouží soubor `extension.conf`, ve kterém je definováno, co se stane, když uživatel vytočí nějaké číslo. Pro zobrazení obsahu souboru lze využít příkaz `nano /etc/asterisk/extensions.conf`. Ten vypadá následovně:

```
exten=>1000,1,Dial(SIP/1000) // exten => číslo,priorita,příkaz(parametry)
exten=>2000,1,Dial(SIP/2000)
```

Po editaci těchto souborů je nutno pro správnou funkci Asterisk restartovat a to příkazem `/etc/init.d/asterisk restart`. Následně Asterisk spustíme příkazem `asterisk -cvvv`. Po připojení SIP zařízení do stejné sítě, kde se nachází Asterisk, dojde k jeho automatickému zaregistrování, které může chvíli trvat. O registraci se dozvíme ve výpisu CLI Asterisku.

7.1.7 Switch ZyXEL XGS-4526

Switch ZyXEL XGS-4526 umožňuje přepínání na vrstvách L2 a L3. Na vrstvě L2 disponuje až přepínací rychlostí až 144 Gbps. Celkem obsahuje 24 portů, z nichž 20 je RJ-45 portů (10/100/1000 Mb/s) pro připojení metalického vedení. Další 4 Gigabitové porty jsou duální porty (RJ-45 nebo SFP). Navíc obsahuje jeden open slot pro doplňkový 10-Gigabitový uplinkový

modul.[14] V topologii je switch využit s připojeným SFP modulem. Tato kombinace umožňuje převádět elektrický signál na optický.

7.1.8 Switch ZyXEL GS-1524

Jedná se o L2 switch, který se vyznačuje jednoduchou konfigurací přes webové rozhraní. Obsahuje celkem 24 Gigabitových portů (20 x RJ-45 a 4x duální porty (RJ-45/SFP)). Součástí switchu je i technologie Auto DoS Attack Prevention, která umožňuje bránit se útokům DoS (Denial of service).[14] V topologii je tento switch využit se zapojeným SFP modulem jako v případě switchu ZyXEL XGS-4526.

7.1.9 SFP moduly XtendLan (XL-MGB-L80-C[xx])

Mini-GBIC neboli SFP (Small-Form-Pluggable) slouží pro rozšíření switchu s SFP porty. Funguje jako převodník mezi optickým a elektrickým signálem a naopak. Pro účely WDM v diplomové práci bylo testováno celkem 8 SFP modulů, ze kterých jsem poté vybral 1 pár pro zapojení do hybridní sítě. Každý z 8 SFP modulů vysílal na rozdílné vlnové délce. Jestliže modul vysílal na vlnové délce 1550 nm, tak jeho modelové číslo končilo ciframi 55(XL-MGB-L80-C55). SFP modul XtendLan obsahuje 1 gigabitový optický port a 2 konektory LC (Duplex) pro připojení optických vláken.

Specifikace parametrů:

- Vysílací vlnová délka (1 SFP modul = 1 vlnová délka):
1610/1590/1570/1550/1530/1510/1490/1470 nm
- Optický výkon (Tx)= +4 dBm
- Citlivost přijímače: -24 dBm
- Pracovní vlnová délka přijímače: 1100-1610 nm
- Dosah 80 - 120 km. [11]

7.1.10 ZyXEL P-870MH

Jedná se o VDSL2 modem. Obsahuje jeden WAN konektor RJ-11 a čtyři LAN porty RJ-45 (10/100M). Modem je vhodný pro poskytovatele Triple play služeb. Maximální rychlost, která je modemem podporovaná je 65 Mb/s ve vzestupném směru a 35 Mb/s v sestupném směru. Navíc modem podporuje VLAN, IGMP snooping. Konfigurace probíhá pomocí příkazové řádky. V konfiguraci modemu bylo potřeba povolit IGMPv2. IP adresa modemu v topologii je 10.2.6.1. [14]

7.1.11 Switch SWH-2126G

Switch obsahuje celkem 24 portů RJ-45 (10/100Mbps) a jeden konsolový port. Přepínač SWH-2126G se v topologii nachází mezi servery (Data, Voip, IPTV) a EPON.

7.1.11.1 Konfigurace

Pro správné fungování bylo nutno nastavit statické směrování multicastových adres na port č.6, který je právě propojen s EPON. Konfigurace probíhala přes webové rozhraní zadáním adresy 192.168.0.1 do internetového prohlížeče.

7.1.12 Simulátor vedení Telebyte 458-3SL

Jedná se o 3-slotové šasi, které umožňuje připojit nejvýše 3 zásuvné moduly pro simulaci vedení. Pomocí tohoto zařízení je tedy možné řídit celkem 24 kanálů a je ideálním řešením pro testování DSL modemů i dalších telekomunikačních zařízení. Kromě ovládání pomocí tlačítek na čelním panelu umístěné pod LCD displejem, je možno simulátor ovládat pomocí PC přes rozhraní RS-232, IEEE-488 a Ethernet. K ovládání jednotky z PC lze navíc použít univerzální grafické uživatelské rozhraní. Pomocí tohoto simulátoru je možné měnit jen délku vedení a ne AWGN šum.

K této diplomové práci byly využity celkem 3 následující zásuvné moduly:

- Modul 458-LM-E20 - umožňuje simulovat vedení s průřezem 0,4 mm s PE izolací až do maximální délky 6500 m po 150 m krocích. Obsahuje jen 1 kanál.
- Modul 458-LM-J20 - umožňuje simulovat vedení s papírovou izolací až do maximální délky 6500 m po 150 m krocích. Obsahuje jen 1 kanál.
- Modul 458-LM-HDE - umožňuje simulovat vedení s průřezem 0,4 mm PE až do maximální délky 9450 m po 150 m krocích v rámci kanálu č.1. Kanály č.2 až 8 lze nastavit maximálně na délku 9000 m po 600 m krocích. Pro účely práce byl využit kanál č.1.

7.1.13 Simulátor vedení Spirent DLS-6900

Simulátor umožňuje simulovat 2 typy kabelů (PE 04 mm, 26AWG). V rámci testování kabelu PE04mm lze simulovat trasu až do 7 km s krokem 100m. Spirent DLS-6900 je vhodný pro testování SHDSL/ ADSL/ADSL2/ADSL2+/ADSL2++ a VDSL2, neboť využívá šířku pásma až 30 MHz. Součástí simulátoru je i interní šumový generátor. Ten umožňuje linku zarušit AWGN šumem (additive white gaussian noise) o úrovních -90 dBm/Hz až 140 dBm/Hz.

7.2 Využité měřicí přístroje

7.2.1 EXFO FTB-500

Jedná se o platformu určenou pro testování v terénu. Na platformě je nainstalován operační systém Windows XP. Obsahuje celkem 8 slotů pro jednotlivé měřicí moduly. Pro měření této diplomové práce byly využity tyto měřicí moduly:



Obrázek 46: EXFO FTB-500.[15]

7.2.1.1 FTB-5800B

Modul pro měření chromatické disperze (CD). Funguje pro rozsahy vlnových délek 1530-1625 nm a 1200-1700 nm.

7.2.1.2 FTB-5240B

Jedná se o optický spektrální analyzátor (Optical Spectrum Analyzer). Umožňuje provádět měření v rozsahu 1250 - 1650 nm.

7.2.1.3 FTB-5500B

Slouží pro měření polarizační vidové disperze (PMD) v rozsahu vlnových délek 1260 až 1675 nm s měřícím rozsahem 0 až 115 ps.

7.2.1.4 FTB-7200D

Jedná se o OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) modul měřící zpětný Rayleighův rozptyl, který nám podává informace o trase. Je schopen testovat jednovidová vlákna (SM) na vlnových délkách 1310, 1550 nm, ale i mnohovidová vlákna (MM) na vlnových délkách 850, 1300 nm. Maximální délka vlákna, kterou je možné testovat u SM vláken je 260 km a u MM 40 km.[15]

7.2.2 EXFO FTB-1/FTB-880 NetBlazer

Platforma FTB-1 je určena pro snadné a efektivní testování FFTH, Ethernet a multiservice. Součástí zařízení je modul FTB-880 NetBlazer, který slouží k testování NGA sítí. V mém případě modul posloužil pro testování Ethernetových služeb pomocí metod RFC6349, RFC2544 a Ethersamu (doporučení ITU-T Y.1564). Modul FTB-880 NetBlazer je osazen Ethernetovým portem RJ-45 (10,100,1000M), SFP, SFP+(10GigE), RJ-48. (zkontrolovat porty).

7.2.2.1 Konfigurace

Zařízení pracuje na operačním systému Windows XP. Po zapnutí přístroje je potřeba se přihlásit jako uživatel SUPERVISOR (není potřeba heslo). Ihned po přihlášení se automaticky spustí modul FTB-880 NetBlazer.

7.2.3 VeEX VePAL BX100V

VePAL BX100V je analyzátor pro testování ADSL/ADSL2/ADSL2+ sítí podporující Triple Play služby. Analyzátor byl využit jako emulátor ADSL2+ modemu pro měření přenosových rychlostí v sestupném a vzestupném směru. Navíc zařízení umožňuje zobrazit parametry jako noise margin, zpoždění, útlum, training time. Další funkcí je i možnost zjistit rozprostření bitů mezi tóny.

7.2.4 EXFO AXS-200/625

EXX AXS-200/625 nabízí rychlou, ale důkladnou metodu pro testování triple play služeb (VoIP, IPTV, data) - ADSL1/2/2+ a Ethernet 10/100. Vhodné je i pro předběžnou kvalifikaci účastnických přípojek pro přenos VDSL2. AXS-200/625 nabízí kromě ověřování konektivity k DSLAMu také parametry jako aktuální datová rychlost, útlum a noise margin (šumová rezerva). Navíc poskytuje pokročilá měření IPTV - packet jitter (kolísání zpoždění paketů), packet loss (ztrátovost paketů), PCR jitter, MDI, PID viewer a IGMP zap time. Přístroj také monitoruje tok hovorů a statistiky VoIP. V rámci datového přenosu umožňuje ping, traceroute, testování rychlosti HTTP a FTP. [58]



Obrázek 47: EXFO AXS-200/850. [58]

7.3 Využité programy

7.3.1 VLC media player

VLC je open source multimediální přehrávač, který umožňuje přehrát velké množství multimediálních souborů, DVD, zvukových CD a různé proudové protokoly. Obrovskou výhodou je, že přehrávač nepožaduje mít nainstalované kodeky. Z tohoto pohledu si přehrávač vystačí úplně sám. Podporuje široké množství typů souborů: MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4, WMV, AVI, WebM, DVD, AAC, MP3 a další. Pro účely této diplomové práce je hlavně využita funkce streamování videa v multicast režimu.

7.3.2 IxChariot

Nástroj IxChariot umožňuje simulovat VoIP, IPTV a datové služby a zároveň umožňuje vytvořit až 100 tisíc spojení mezi jednotlivými uživateli, což se hodí pro posuzování kvality celé sítě. Navíc program podporuje protokoly TCP, RTP, UDP, IPv4/v6.

7.3.3 BWMeter

Program BWMeter umožňuje měřit a zaznamenávat objem přenesených dat přes síťové rozhraní.

8 Výsledky měření na optické části

V této části jsou prezentovány výsledky, které byly naměřeny na optické části sítě. Přesněji se jedná o měření útlumu, chromatické disperze a polarizační vidové disperze na optických trasách. Dále se zde nacházejí výsledky vložných ztrát splitteru, výkonových úrovní EPON a spektrální analýza WDM.

8.1 Měření útlumu optických tras

Měření útlumu optických tras bylo provedeno pomocí metody OTDR (MaxTester). Při této metodě se využívá zpětného rozptylu, ke kterému dochází při průchodu optického pulzu vláknem. Velkou výhodou OTDR je, že stačí mít k dispozici jen jeden konec testovaného vlákna. Mezi testované vlákno a OTDR přístroj se navíc využívá předřadné vlákno k eliminaci mrtvé zóny. V mém případě se jednalo o vlákno dlouhé 237 metrů. Schéma zapojení je možné si prohlédnout na obrázku č.48. Jednotlivé trasy se nachází na učebně EB315 a jsou vyvedeny do racku na učebně EB316. Trasy se skládají z jednotlivých vláken typu G.652.A o délce 5 a 10 km, tudíž trasa 15 km je tvořena kombinací dvou tras (10 a 5 km). Trasy se vyznačují vyššími hodnotami útlumu, jelikož jejich stáří je už přibližně 25 let a obsahují množství svárů, konektorů, spojek. V tabulce č.16 je možné si prohlédnout naměřené hodnoty celkového i měrného útlumu pro jednotlivé trasy. Pro vlnovou délku 1310 nm jsou hodnoty útlumu o něco vyšší než pro vlnovou délku 1550 nm.



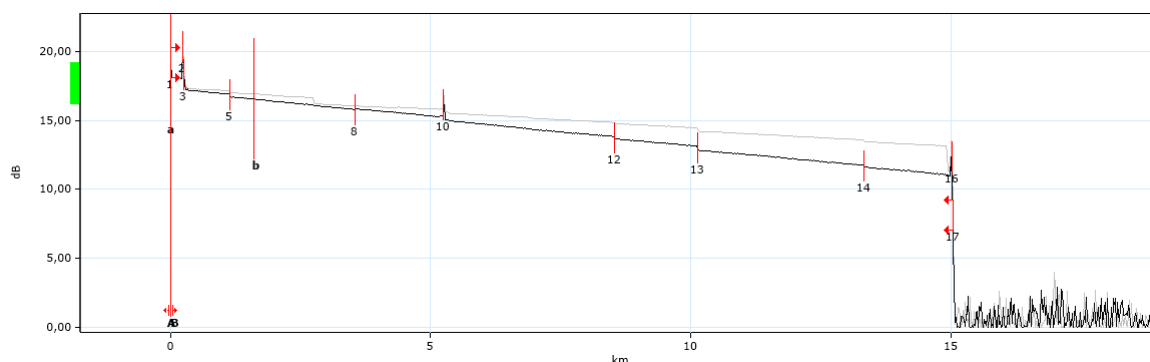
Obrázek 48: Schéma zapojení při měření pomocí OTDR.

L[km]	port trasy	1310 nm		1550 nm	
		IL[dB]	α [dB/km]	IL[dB]	α [dB/km]
5,013	6-18 (5 km)	2,81	0,560	2,203	0,439
9,792	1-13 (10 km)	5,061	0,517	3,192	0,325
14,778	2-14 (10 km) a 5-17 (5 km)	7,224	0,488	5,12	0,346
19,57	7-19 a 3-15 (2x 10 km)	10,632	0,543	7,391	0,377

Tabulka 16: Hodnoty útlumu pro jednotlivé trasy.

Na obrázku č.49 je ukázán reflektogram, který je výsledkem měření metody OTDR pro optickou trasu 15 km. Reflektogram obsahuje několik očíslovaných událostí. Z reflektogramu

lze vyčíst, že bylo použito předřadné vlákno o velikosti 237 metrů (mezi událostmi 2 a 3). Následně při 2. události dochází k odrazu na konektoru (v reflektogramu špička) a poté při detailním přiblížení dochází po asi 30 metrech k dalšímu odrazu na konektoru (událost č. 3). Tenhle průběh je právě způsoben propojením učeben (EB315 a EB316) pomocí optického vlákna o délce přibližně 30 metrů. Události 5, 12, 13 a 14 symbolizují svár vláken. Spoj optických tras 5 km a 10 km značí událost č. 10.



Obrázek 49: Reflektogram pro optickou trasu 15 km.

8.2 Měření chromatické disperze (CD) na optických trasách

Chromatická disperze je způsobena rozdílnou rychlostí šíření různých spektrálních složek. To znamená, že každá jiná frekvence záření se šíří rozdílnou rychlostí. Zdroj záření není monochromatický a vyzařuje právě několik spektrálních složek. To má za následek roztažení pulzů na konci vlákna. CD se skládá z materiálové a vlnovodné disperze. Materiálová disperze vzniká v závislosti indexu lomu materiálu (u optických vláken sklo) na frekvenci záření. Vlnovodnou disperzi je možné ovlivňovat profilem indexu lomu. Tato disperze je pokaždé záporná a lze využít ke kompenzaci materiálové disperze.



Obrázek 50: Schéma zapojení při měření CD.

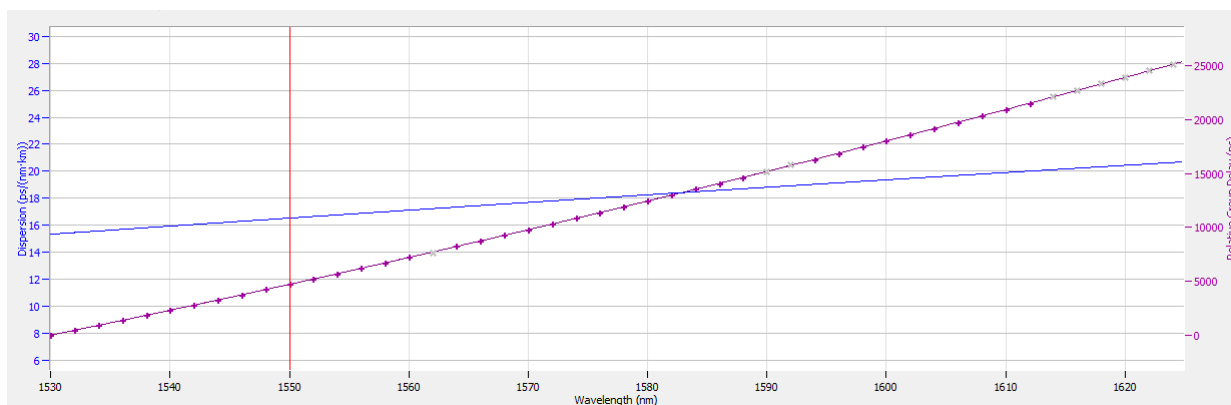
Měření proběhlo na totožných optických trasách, na kterých byl měřen útlum. Při měření CD bylo nejprve potřeba na začátek propojit jen měřicí přístroj FTB-500 (s modulem FTB-5800B) s laserovým zdrojem (FLS-5800A) pro účely reference optického signálu. Po úspěšné referenci

bylo nutné na začátek testované trasy připojit laser a na konec trasy připojit zařízení FTB-500 (viz obrázek č.50). Při nastavení měření bylo potřeba zadat délku měřeného optického vlákna. Naměřené hodnoty chromatické disperze při vlnové délce 1550 nm u jednotlivých optických tras jsou zobrazeny v tabulce č.17.

L[km]	CD[ps/(nm*km)]	slope[ps/nm ²]
5,013	16,846	0,059227
9,792	16,714	0,058933
14,778	16,548	0,058985
19,57	16,702	0,058922

Tabulka 17: Naměřené hodnoty CD při 1550 nm u jednotlivých optických tras.

Měření CD probíhá pomocí metody fázového posuvu, kdy se porovnává fáze vstupního a výstupního signálu, proto je nutné na začátku měření provést vždy referenci pro zjištění fáze vstupního signálu. Výsledkem měření je graf (obrázek č.51) zobrazující závislost chromatické disperze (modrá křivka) a relativního skupinového zpoždění RGD (fialová křivka) na vlnové délce.



Obrázek 51: Výsledek měření CD.

8.3 Měření polarizační vidové disperze (PMD) na optických trasách

Optický signál se ve vlákne šíří ve dvou polarizačních rovinách, ale každá polarizační rovina se šíří rozdílnou rychlostí, jelikož index lomu vlákna v celém průřezu není konstantní. Změna indexu lomu může být způsobena výrobní nedokonalostí, ale zejména faktory, jako jsou tlak, tah, teplota, vítr. Hodnota PMD není konstantní, protože účinky jednotlivých vlivů na vlákno se nedají určit a ani množství působících faktorů. Vlivem PMD tedy vzniká časové zpoždění jedné polarizační roviny oproti druhé a to má za následek roztahování pulzu v čase.

Měření hodnot PMD bylo provedené na stejných optických trasách, na kterých bylo provedeno měření hodnot útlumu a CD. Měřicí soustava se skládala z přístroje FTB-500(s modulem FTB-5500B) připojeného ke konci trasy a z širokopásmového zdroje FLS-5800A umístěného na



Obrázek 52: Schéma zapojení při měření PMD.

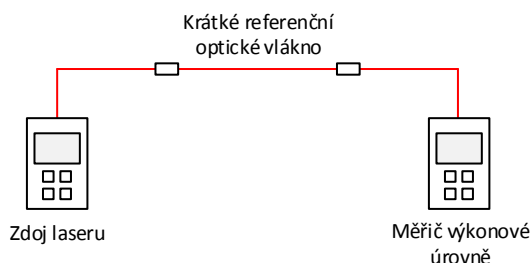
L [km]	PMD [ps]	Koeficient PMD [$\text{ps}/\text{km}^{1/2}$]
5,013	1,584	0,707
9,792	1,461	0,467
14,778	1,806	0,47
19,57	2,24	0,506

Tabulka 18: Hodnoty PMD pro jednotlivé optické trasy.

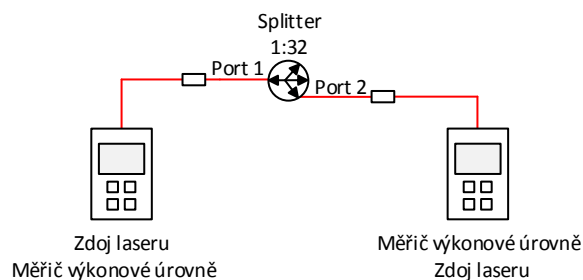
začátku trasy (viz obrázek č.52). Před samotným měřením PMD se neprovádí reference zdrojového záření, jak tomu bylo u měření CD. Na každé jednotlivé trase bylo provedeno několik měření, z kterých byl poté počítán průměr. Průměrné hodnoty PMD si lze prohlédnout v tabulce č. 18.

8.4 Měření vložných ztrát splitteru

K získání vložných ztrát (útlumu) optického splitteru 1 : 32, který je použit v síti EPON, bylo využito metody C. Tato metoda využívá celkem tři optická vlákna, kde jedno z nich je referenční vlákno (prostřední). Topologie zapojení metody 1C je ukázána na obrázku č.53. Po referenčním měření se referenční vlákno vymění za měřený splitter. Dále pomocí laseru na jednom konci a měřiče výkonové úrovně na druhém konci je možné zjistit hodnoty útlumu, které je možné rovnou odečítat z přístroje díky referenčnímu měření. Topologie pro měření útlumu splitteru 1 : 32 je znázorněna na obrázku č.54. Při práci byly jen využívány porty 1 (vstup) a 2 (výstup). Naměřené hodnoty útlumu jsou uvedeny v tabulce č.19.



Obrázek 53: Metoda 1C.



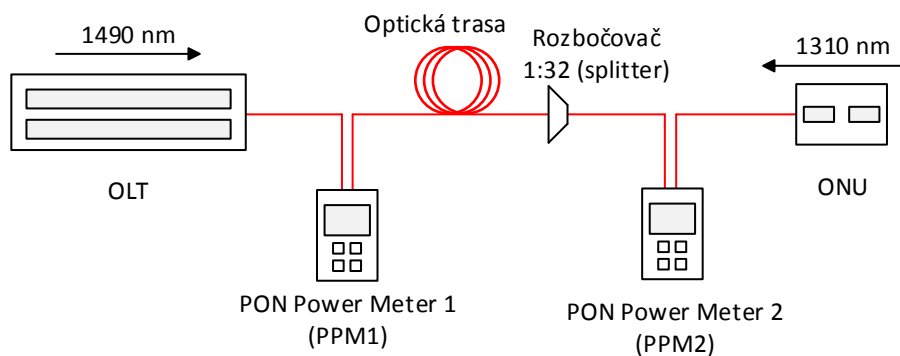
Obrázek 54: Topologie pro měření útlumu splitteru.

Tabulka 19: Naměřené hodnoty vložných ztrát splitteru 1 : 32 (port 1 a 2).

	Vložné ztráty [dB]	
	Splitter 1 : 32	
λ [nm]	1 \rightarrow 2	2 \rightarrow 1
1310	16,24	16,44
1550	16,09	16,25

8.5 Výkonové úrovně EPON

Výkonové úrovně optické pasivní sítě EPON byly změřeny pomocí dvou přístrojů PON Power Meter (EXGO PPM-350-EG, EXGO PPM-350B-EG). Každý přístroj byl umístěn na jednom konci distribuční ODN sítě (přesněji za OLT jednotkou a před ONU jednotkou) a každý tento přístroj měřil výkonové úrovně obou optických signálů na vlnových délkách 1490 nm (vysílá OLT) a 1310 nm (vysílá ONU). Měření bylo prováděno s různou délkou optických tras a se splitterem s rozdělovacím poměrem 1 : 32. Schéma zapojení měřících přístrojů v EPON síti se splitterem 1 : 32 je zobrazeno na obrázku č.55. Naměřené hodnoty se nachází v tabulce č.20.



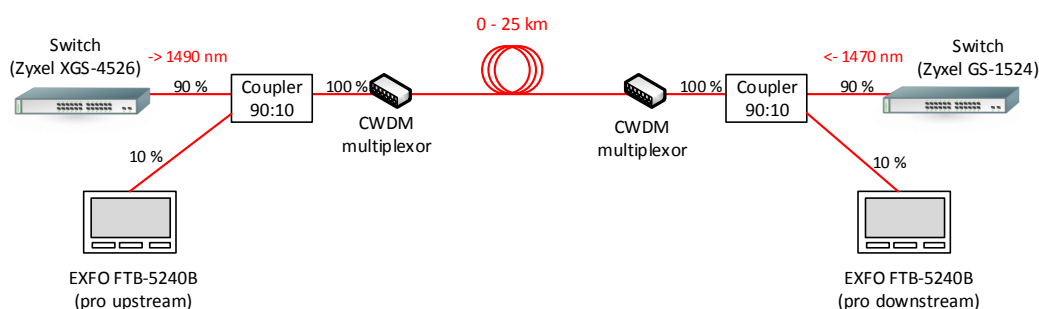
Obrázek 55: Schéma zapojení při měření výkonové úrovně EPON.

Tabulka 20: Naměřené hodnoty výkonových úrovní v síti EPON.

	Optický výkon [dBm]			
	PPM1		PPM2	
L [km]	1490 nm	1310 nm	1490 nm	1310 nm
0	4,3	-16,8	-15,9	3
5,013	4,3	-19,4	-17,7	3,1
9,792	4,3	-22,4	-19,6	3,1
14,778	4,3	-26,1	-23,8	3,1
19,57	4,4	-29,9	-25,4	3,1

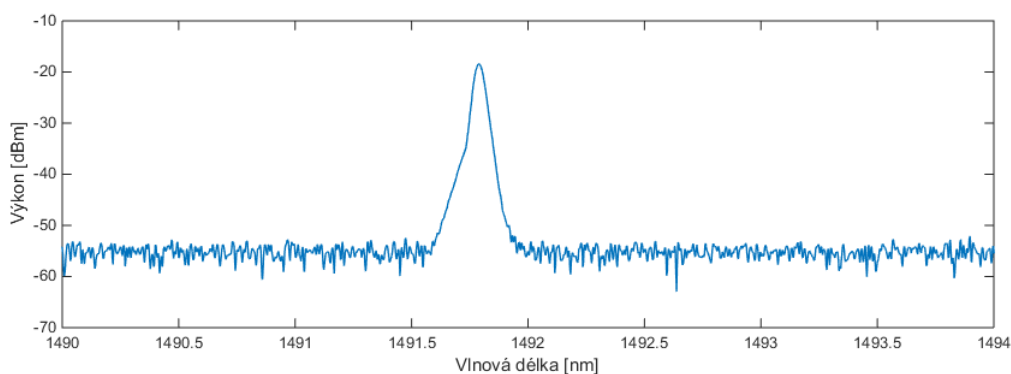
8.6 Spektrální analýza systému WDM

Pro realizaci systému WDM byly vybrány dva SFP moduly s vlnovými délkami 1490 nm a 1470 nm. Tyto vlnové délky tvořili 1 obousměrný komunikační kanál. Pro downstream byla využita vlnová délka 1490 nm a pro upstream vlnová délka 1470 nm. Spektrální analýza WDM sítě proběhla pomocí přístroje EXFO FTB 500 s modulem FTB-5400B tvořící optický spektrální analyzátor. Při měření byl využit optický coupler, který rozdělával optický výkon v poměru 90/10 %, kde 10 % procent výkonu bylo vyhodnocováno přístrojem. Po stanovení útlumu měřicí soustavy s couplerem byly hodnoty dopočítány do 100 %. Topologie pro měření výkonu v obou směrech je zobrazena na obrázku č. 56. Parametry optického signálu byly změřeny i pro délku 25 km, respektive 24,583 km. Tato trasa se skládala z optické trasy 5,013 km a 19,57 km.



Obrázek 56: Topologie pro měření optického spektra.

V tabulce č. 21 je možné si prohlédnout naměřené parametry pro vlnovou délku 1491,789 nm (downstream) v kombinaci s optickou trasou. Na obrázku č. 57 je zobrazeno optické spektrum při optické trase 24,583 km pro směr downstream.

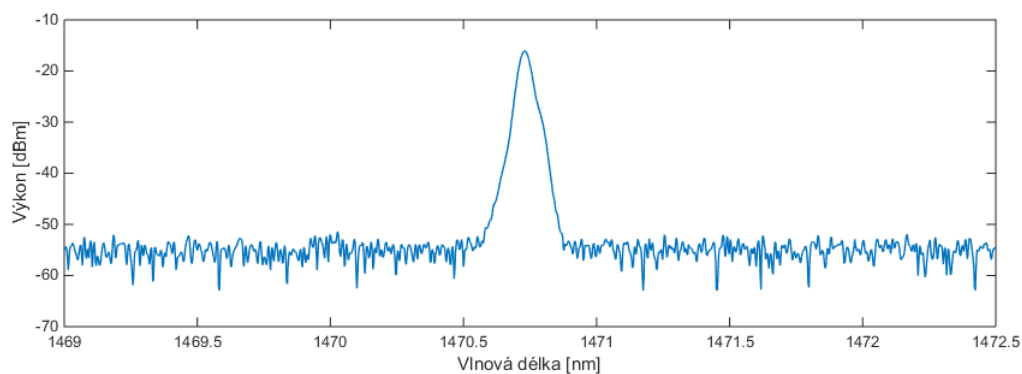


Obrázek 57: Spektrum při optické trase 24,583 km (1491,789 nm - downstream)

Dále v tabulce č. 22 se nacházejí naměřené parametry pro vlnovou délku 1470,730 nm (upstream) v kombinaci s optickou trasou v rozmezí 0 až 25 km. Na obrázku č. 58 je zobrazeno optické spektrum při optické trase 24,583 km pro směr upstream.

Tabulka 21: Naměřené parametry pro 1491,789 nm (downstream).

	Downstream (1491,789 nm)	
Délka [km]	Výkon signálu [dBm]	SNR [dB]
0	-5,12	46,96
5,013	-8,69	44,95
9,792	-10,74	43,09
14,778	-14,36	39,69
19,57	-15,91	35,15
24,583	-18,4	33,68



Obrázek 58: Spektrum při optické trase 24,583 (1470,730 nm - upstream)

Tabulka 22: Naměřené parametry pro vlnovou délku 1470,730 nm (upstream).

	Upstream (1470,730 nm)	
Délka [km]	Výkon signálu [dBm]	SNR [dB]
0	-2,2	47,95
5,013	-6,04	42,36
9,792	-8,4	41,52
14,778	-11,63	43,1
19,57	-13,67	38,06
24,583	-16,05	35,59

9 Výsledky měření na metalické části

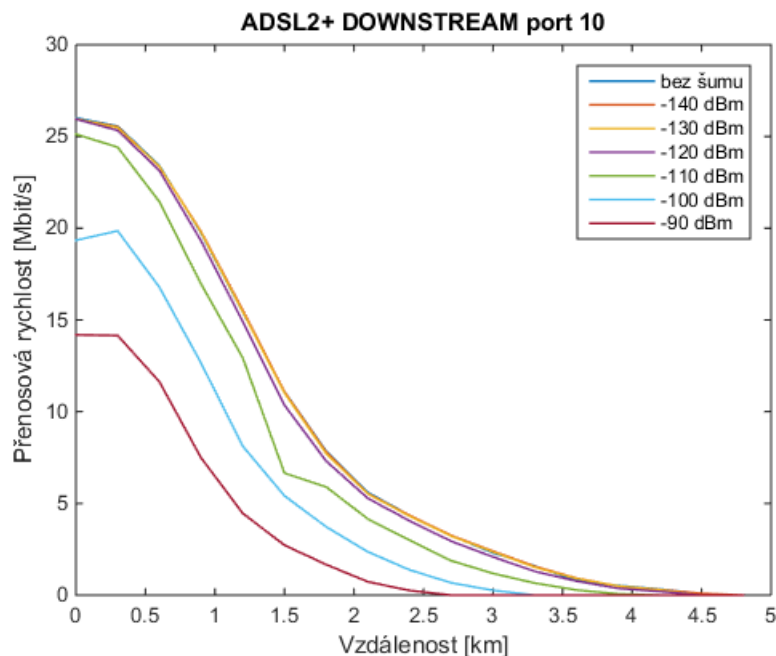
Tato kapitola obsahuje výsledky přenosových rychlostí u ADSL2+ a VDSL2 profilů. Jednotlivé hodnoty byly měřeny v kombinaci s různou délkou tras. Pro simulování metalického vedení byly využity 2 simulátory vedení, kde simulátor Telebyte 458-3SL obsahoval 3 moduly. Simulátor Spirent DLS-9600 navíc umožňoval vložit do trasy šum v rozmezí -140 dBm/Hz až -90 dBm/Hz (nejvyšší hodnota šumu)

9.1 ADSL2+ přenosové rychlosti

Pro účely diplomové práce byl využit port číslo 10, který měl nastavené přenosové rychlosti na maximum. Reálná přenosová rychlost bez trasy byla změřena na 26 Mbit/s v sestupném směru a 1,387 Mbit/s ve vzestupném směru. Na měření přenosových rychlostí byl využit přístroj VeEX VePAL BX100V.

Tabulka 23: ADSL2+ downstream přenosové rychlosti na portu č. 10 v kombinaci s trasou a šumem.

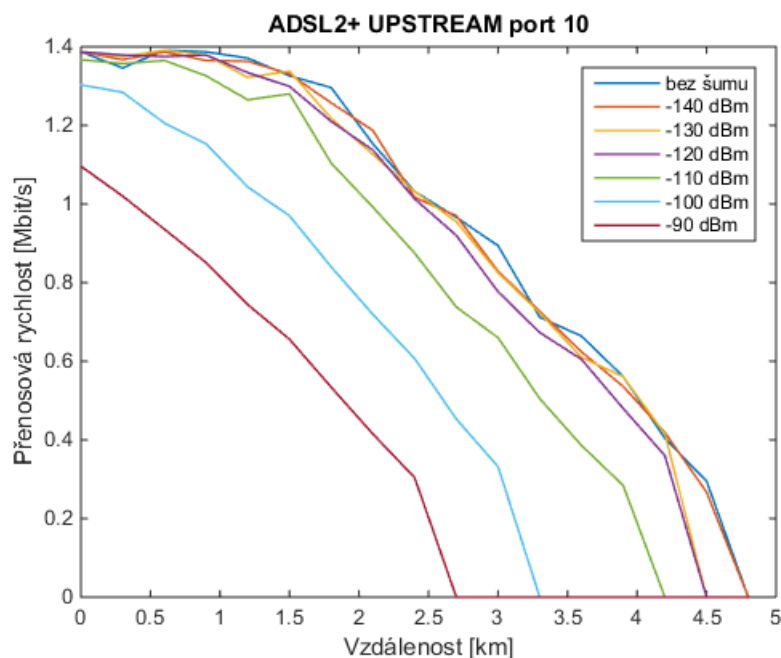
Název simulátoru - Spirent DLS-6900								
ADSL2+ Port 10 DOWNSTREAM [Mbit/s]								
	šum[dBm/Hz]							
trasa [km]	bez šumu	-140	-130	-120	-110	-100	-90	přenosová rychlost při hraniční hodnotě šumu (rychlost[šum])
0	26,007	25,955	25,967	25,947	25,122	19,342	14,184	-
0,3	25,561	25,525	25,485	25,331	24,417	19,854	14,153	-
0,6	23,413	23,362	23,374	23,142	21,449	16,787	11,633	-
0,9	19,736	19,818	19,771	19,307	16,96	12,652	7,486	-
1,2	15,427	15,538	15,447	14,908	12,932	8,119	4,458	-
1,5	11,096	11,088	11,017	10,356	6,656	5,414	2,725	-
1,8	7,844	7,801	7,714	7,305	5,898	3,725	1,667	-
2,1	5,595	5,532	5,52	5,273	4,153	2,36	0,728	-
2,4	4,345	4,353	4,309	4,051	2,996	1,378	0,256	-
2,7	3,235	3,251	3,215	2,937	1,874	0,67	0	0,208[-95]
3	2,312	2,4	2,364	2,085	1,184	0,264	0	0,064[-98]
3,3	1,585	1,573	1,525	1,296	0,658	0	0	0,172[-103]
3,6	0,797	0,925	0,906	0,766	0,28	0	0	0,064[-106]
3,9	0,521	0,497	0,497	0,372	0,068	0	0	0,068[-110]
4,2	0,324	0,304	0,292	0,2	0	0	0	0,132[-117]
4,5	0,086	0,092	0	0	0	0	0	0,092[-140]
4,8	0	0	0	0	0	0	0	-
poslední naměřená trasa [km] + přenosová rychlost [Mbit/s]								
trasa	4,5	4,5	4,4	4,3	3,9	3	2,4	-
př. rychlost	0,086	0,092	0,103	0,154	0,068	0,8	0,256	-



Obrázek 59: ADSL2+ DOWNSTREAM.

Tabulka 24: ADSL2+ upstream přenosové rychlosti na portu č. 10 v kombinaci s trasou a šumem.

Název simulátoru - Spirent DLS-6900								
ADSL2+ Port 10 UPSTREAM [Mbit/s]								
	šum[dBm/Hz]							
trasa [km]	bez šumu	-140	-130	-120	-110	-100	-90	přenosová rychlost při hraniční hodnotě šumu (rychlost[šum])
0	1,387	1,387	1,387	1,387	1,367	1,303	1,096	-
0,3	1,346	1,367	1,375	1,379	1,357	1,284	1,02	-
0,6	1,391	1,387	1,391	1,375	1,365	1,206	0,936	-
0,9	1,387	1,365	1,379	1,379	1,326	1,153	0,851	-
1,2	1,371	1,363	1,322	1,334	1,265	1,043	0,744	-
1,5	1,326	1,331	1,338	1,299	1,28	0,97	0,656	-
1,8	1,296	1,257	1,218	1,21	1,104	0,84	0,534	-
2,1	1,153	1,187	1,126	1,137	0,992	0,719	0,415	-
2,4	1,032	1,017	1,032	1,013	0,875	0,607	0,304	-
2,7	0,966	0,97	0,955	0,92	0,738	0,453	0	0,297[-95]
3	0,894	0,829	0,825	0,777	0,66	0,332	0	0,276[-98]
3,3	0,712	0,727	0,723	0,673	0,505	0	0	0,304[-103]
3,6	0,664	0,624	0,61	0,605	0,386	0	0	0,276[-106]
3,9	0,561	0,536	0,561	0,48	0,284	0	0	0,284[-110]
4,2	0,404	0,419	0,415	0,36	0	0	0	0,321[-117]
4,5	0,295	0,267	0	0	0	0	0	0,267[-140]
4,8	0	0	0	0	0	0	0	-
poslední naměřená trasa [km] + přenosová rychlost [Mbit/s]								
trasa	4,5	4,5	4,4	4,3	3,9	3	2,4	-
př. rychlost	0,295	0,267	0,251	0,305	0,284	0,322	0,304	-



Obrázek 60: ADSL2+ UPSTREAM.

Tabulka 25: ADSL2+ rychlosti na portu č. 10 v kombinaci s trasou (Simulátor se 3 moduly).

Port 10 přenosové rychlosti [Mb/s]						
Simulátor obsahuje celkem 3 moduly						
Vzdálenost [km]	458-LM-E20		458-LM-J20		458-LM-HDE	
	DS	US	DS	US	DS	US
0	25,983	1,387	26,011	1,387	26,011	1,387
0,3	24,977	1,391	24,163	1,342	25,402	1,363
0,6	22,027	1,391	19,291	1,363	22,929	1,391
0,9	17,952	1,349	14,255	1,367	19,267	1,387
1,2	14,125	1,311	9,817	1,311	15,27	1,375
1,5	10,368	1,299	6,534	1,303	10,777	1,292
1,8	7,305	1,176	5,041	1,199	7,27	1,269
2,1	5,332	1,089	3,756	1,058	5,344	1,172
2,4	4,035	0,974	2,619	0,97	4,313	1,028
2,7	3,003	0,909	1,632	0,875	3,239	0,939
3	2,077	0,77	1,065	0,758	2,29	0,821
3,3	1,202	0,681	0,677	0,641	1,398	0,731
3,6	0,592	0,778	0,308	0,547	0,875	0,62
3,9	0,384	0,505	0,144	0,414	0,48	0,533
4,2	0,196	0,386	0	0	0,244	0,404
4,5	0	0	0	0	0	0
poslední nameřená vzdálenost + přenosové rychlosti						
vzdálenost [km]	4,35		3,9		4,2	
př. rychlost [Mb/s]	0,18	0,335	0,144	0,414	0,196	0,386

9.2 VDSL2 přenosové rychlosti

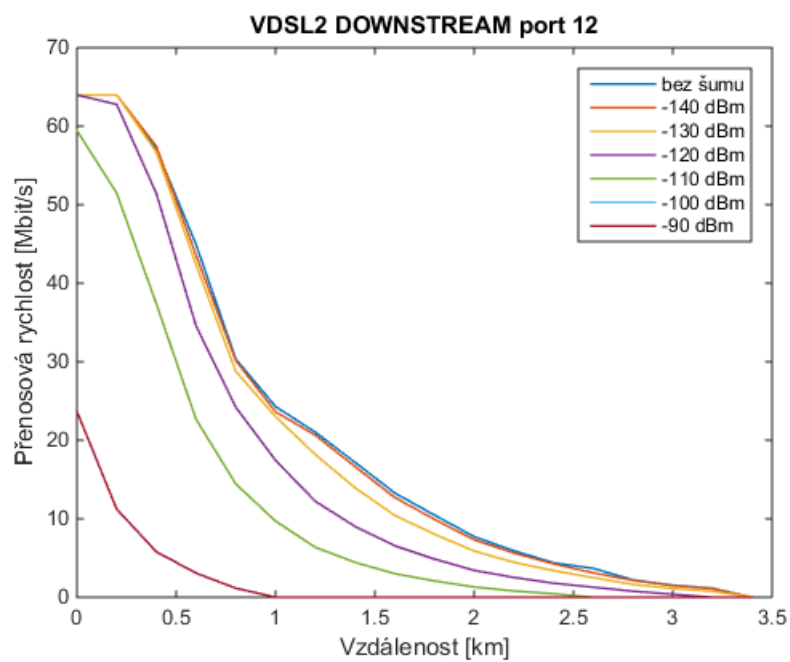
Měření jednotlivých rychlostí na VDSL2 portech proběhlo pomocí VDSL2 modemu, jelikož nebyl dostupný žádný měřicí přístroj. Jednotlivé porty jsou vyvedeny nad VDSL2 DSLAM a jejich celkem 12. Každému portu odpovídá jeden přenosový profil nastavený na VDSL2 DSLAMu. Všechny 12 portů bylo proměřeno a výsledky jsou zpracované v tabulce č.36. Navíc posledních 5 portů (7-12) bylo vybráno a proměřeno v kombinaci s trasou i šumem pomocí simulátoru vedení Spirent DLS 6900 a Telebyte 458-3SL (jen trasa). Zpracované výsledky se nacházejí níže.

Tabulka 26: VDSL2 downstream přenosové rychlosti na portu č. 12 v kombinaci s trasou a šumem.

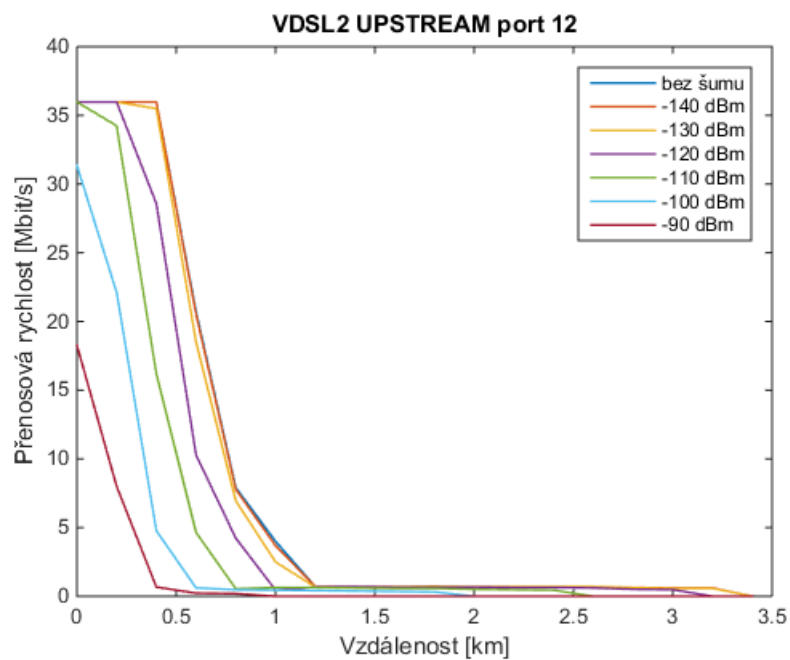
Název simulátoru - Spirent DLS-6900								
VDSL2 Port 12 DOWNSTREAM [Mbit/s]								
	šum[dBm/Hz]							
trasa [km]	bez šumu	-140	-130	-120	-110	-100	-90	přenosová rychlost při hraniční hodnotě šumu (rychlost[šum])
0	63,968	63,968	63,968	63,968	59,456	42,848	23,68	-
0,2	63,968	63,968	63,968	62,784	51,488	33,696	11,232	-
0,4	57,088	57,44	56,704	51,424	37,376	17,792	5,792	-
0,6	44,928	43,552	42,368	34,56	22,656	11,232	3,072	-
0,8	30,336	30,144	28,768	24,192	14,432	6,336	1,152	-
1	24,288	23,616	23,008	17,44	9,696	4	0	0,608[-91]
1,2	21,024	20,64	18,176	12,224	6,368	2,304	0	0,160[-92]
1,4	17,184	16,64	13,952	9,024	4,448	1,344	0	0,256[-95]
1,6	13,28	12,704	10,432	6,56	3,008	0,672	0	0,192[-97]
1,8	10,464	9,92	8,032	4,864	2,08	0,256	0	0,256[-100]
2	7,712	7,328	5,888	3,424	1,312	0	0	0,256[-103]
2,2	5,92	5,632	4,448	2,528	0,8	0	0	0,288[-106]
2,4	4,384	4,256	3,392	1,792	0,448	0	0	0,224[-108]
2,6	3,68	3,104	2,496	1,28	0	0	0	0,256[-111]
2,8	2,208	2,144	1,632	0,768	0	0	0	0,192[-114]
3	1,536	1,472	1,12	0,384	0	0	0	0,224[-118]
3,2	1,152	1,088	0,768	0	0	0	0	0,192[-121]
3,4	0	0	0	0	0	0	0	-

Tabulka 27: VDSL2 upstream přenosové rychlosti na portu č. 12 v kombinaci s trasou a šumem.

Název simulátoru - Spirent DLS-6900								
VDSL2 Port 12 UPSTREAM [Mbit/s]								
	šum[dBm/Hz]							
trasa [km]	bez šumu	-140	-130	-120	-110	-100	-90	přenosová rychlost při hraniční hodnotě šumu (rychlost[šum])
0	35,968	35,968	35,968	35,968	35,968	31,36	18,272	-
0,2	35,968	35,968	35,968	35,968	34,24	22,112	8	-
0,4	35,968	35,968	35,968	28,576	16,192	4,768	0,672	-
0,6	20,704	20,512	18,496	10,272	4,64	0,608	0,224	-
0,8	7,904	7,776	6,944	4,224	0,544	0,48	0,192	-
1	4	3,68	2,496	0,448	0,64	0,448	0	0,192[-91]
1,2	0,704	0,704	0,672	0,672	0,64	0,416	0	0,160[-92]
1,4	0,704	0,704	0,704	0,704	0,608	0,384	0	0,224[-95]
1,6	0,704	0,704	0,704	0,672	0,576	0,352	0	0,256[-97]
1,8	0,736	0,704	0,736	0,672	0,576	0,32	0	0,32[-100]
2	0,704	0,704	0,704	0,672	0,512	0	0	0,352[-103]
2,2	0,704	0,704	0,704	0,64	0,48	0	0	0,384[-106]
2,4	0,704	0,704	0,704	0,64	0,448	0	0	0,416[-108]
2,6	0,704	0,704	0,704	0,608	0	0	0	0,448[-111]
2,8	0,64	0,64	0,64	0,512	0	0	0	0,416[-114]
3	0,608	0,608	0,576	0	0	0	0	0,448[-118]
3,2	0,608	0,608	0,576	0	0	0	0	0,408[-121]
3,4	0	0	0	0	0	0	0	-



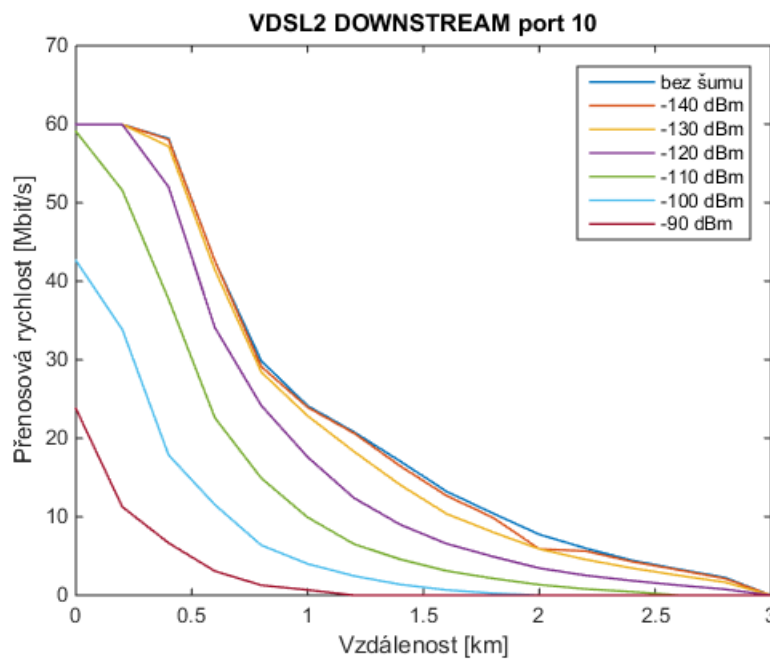
Obrázek 61: VDSL2 DOWNSTREAM - PORT 12.



Obrázek 62: VDSL2 UPSTREAM - PORT12.

Tabulka 28: VDSL2 downstream přenosové rychlosti na portu č. 10 v kombinaci s trasou a šumem.

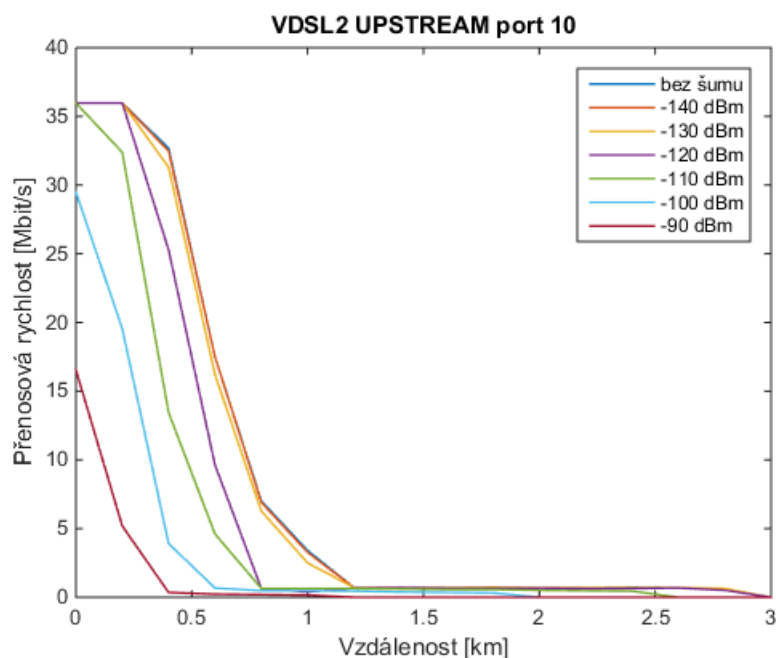
Název simulátoru - Spirent DLS-6900								
VDSL2 Port 10 DOWNSTREAM [Mbit/s]								
	šum[dBm/Hz]							
trasa [km]	bez šumu	-140	-130	-120	-110	-100	-90	přenosová rychlost při hraniční hodnotě šumu (rychlost[šum])
0	59,968	59,968	59,968	59,968	59,072	42,624	23,776	-
0,2	59,968	59,968	59,968	59,968	51,584	33,856	11,264	-
0,4	58,176	58,048	57,184	52	37,696	17,856	6,656	-
0,6	42,56	42,56	41,408	34,08	22,562	11,52	3,072	-
0,8	29,856	29,12	28,416	24,16	14,912	6,368	1,28	-
1	24,128	23,936	22,848	17,6	9,92	4	0,68	-
1,2	20,8	20,64	18,304	12,384	6,528	2,464	0	0,192[-92]
1,4	17,056	16,448	14,048	8,992	4,576	1,376	0	0,288[-95]
1,6	13,216	12,672	10,368	6,56	3,104	0,672	0	0,192[-97]
1,8	10,432	9,888	8,032	4,928	2,144	0,256	0	0,256[-100]
2	7,744	5,888	5,888	3,456	1,344	0	0	0,384[-104]
2,2	5,984	5,632	4,544	2,528	0,8	0	0	0,192[-105]
2,4	4,448	4,288	3,456	1,856	0,448	0	0	0,256[-108]
2,6	3,328	3,232	2,528	1,28	0	0	0	0,256[-111]
2,8	2,272	2,144	1,664	0,768	0	0	0	0,288[-115]
3	0	0	0	0	0	0	0	-



Obrázek 63: VDSL2 DOWNSTREAM - PORT 10.

Tabulka 29: VDSL2 upstream přenosové rychlosti na portu č. 10 v kombinaci s trasou a šumem.

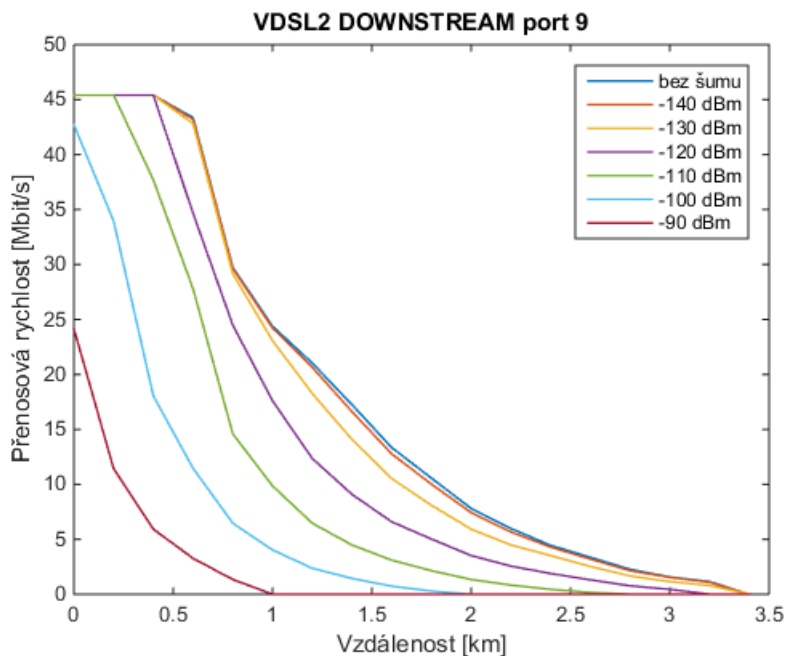
Název simulátoru - Spirent DLS-6900								
VDSL2 Port 10 UPSTREAM [Mbit/s]								
	šum[dBm/Hz]							
trasa [km]	bez šumu	-140	-130	-120	-110	-100	-90	přenosová rychlost při hraniční hodnotě šumu (rychlost[šum])
0	35,968	35,968	35,968	35,968	35,968	29,472	16,544	-
0,2	35,968	35,968	35,968	35,968	32,384	19,552	5,184	-
0,4	32,672	32,48	31,296	25,28	13,44	3,904	0,352	-
0,6	17,504	17,504	16,224	9,632	4,608	0,672	0,224	-
0,8	7,008	6,912	6,272	0,64	0,64	0,48	0,192	-
1	3,392	3,264	2,496	0,384	0,64	0,48	0,16	-
1,2	0,704	0,704	0,704	0,672	0,64	0,448	0	0,160[-92]
1,4	0,704	0,704	0,704	0,704	0,608	0,384	0	0,192[-95]
1,6	0,704	0,704	0,704	0,672	0,576	0,352	0	0,256[-97]
1,8	0,736	0,736	0,736	0,672	0,576	0,32	0	0,32[-100]
2	0,704	0,704	0,704	0,672	0,512	0	0	0,384[-104]
2,2	0,704	0,704	0,704	0,64	0,48	0	0	0,352[-105]
2,4	0,736	0,704	0,704	0,64	0,448	0	0	0,416[-108]
2,6	0,704	0,704	0,704	0,68	0	0	0	0,448[-111]
2,8	0,64	0,64	0,64	0,512	0	0	0	0,448[-115]
3	0	0	0	0	0	0	0	-



Obrázek 64: VDSL2 UPSTREAM - PORT10.

Tabulka 30: VDSL2 downstream přenosové rychlosti na portu č. 9 v kombinaci s trasou a šumem.

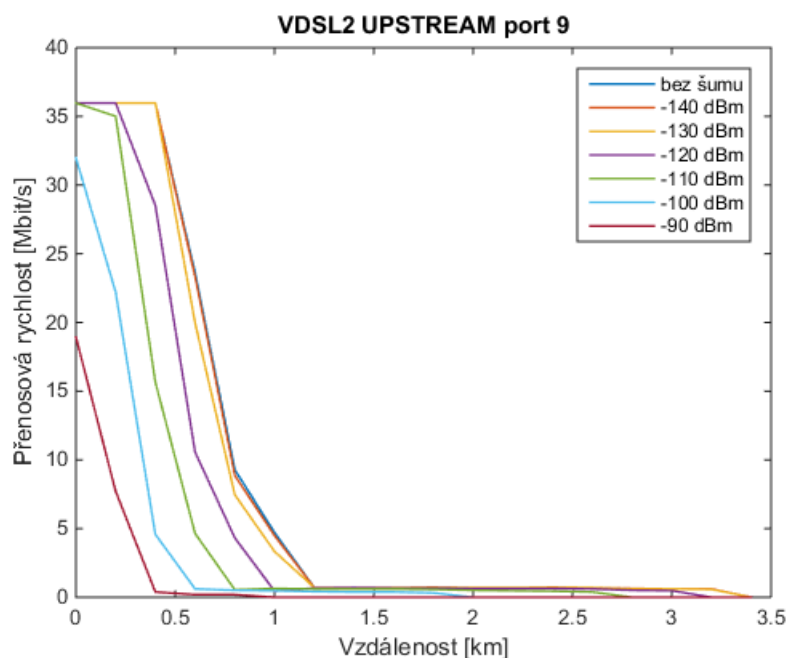
Název simulátoru - Spirent DLS-6900								
VDSL2 Port 9 DOWNSTREAM [Mbit/s]								
	šum[dBm/Hz]							
trasa [km]	bez šumu	-140	-130	-120	-110	-100	-90	přenosová rychlost při hraniční hodnotě šumu (rychlost[šum])
0	45,408	45,408	45,408	45,408	45,408	42,72	24,16	-
0,2	45,408	45,408	45,408	45,408	45,408	33,952	11,424	-
0,4	45,408	45,408	45,408	45,408	37,696	18,048	5,92	-
0,6	43,36	43,2	42,816	34,656	27,784	11,456	3,264	-
0,8	29,728	29,632	29,152	24,48	14,592	6,464	1,344	-
1	24,384	24,224	23,072	17,6	9,856	4,032	0	0,608[-91]
1,2	21,024	20,64	18,272	12,352	6,464	2,368	0	0,224[-92]
1,4	17,248	16,608	14,08	9,088	4,48	1,44	0	0,288[-95]
1,6	13,344	12,768	10,528	6,592	3,104	0,736	0	0,224[-97]
1,8	10,56	10,016	8,096	5,024	2,144	0,88	0	0,16[-99]
2	7,808	7,424	5,92	3,52	1,344	0	0	0,288[-103]
2,2	5,984	5,664	4,48	2,56	0,832	0	0	0,192[-105]
2,4	4,448	4,288	3,52	1,888	0,448	0	0	0,256[-108]
2,6	3,36	3,2	2,528	1,312	0,16	0	0	0,16[-110]
2,8	2,272	2,144	1,664	0,768	0	0	0	0,160[-113]
3	1,568	1,536	1,152	0,448	0	0	0	0,192[-117]
3,2	1,152	1,088	0,8	0	0	0	0	0,192[-121]
3,4	0	0	0	0	0	0	0	-



Obrázek 65: VDSL2 DOWNSTREAM - PORT9.

Tabulka 31: VDSL2 upstream přenosové rychlosti na portu č. 9 v kombinaci s trasou a šumem.

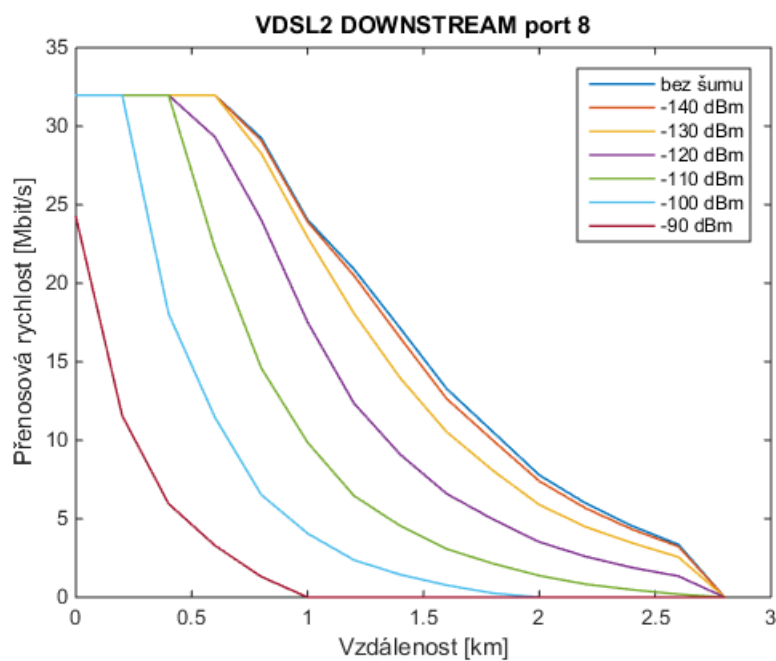
Název simulátoru - Spirent DLS-6900								
VDSL2 Port 9 UPSTREAM [Mbit/s]								
	šum[dBm/Hz]							
trasa [km]	bez šumu	-140	-130	-120	-110	-100	-90	přenosová rychlost při hraniční hodnotě šumu (rychlost[šum])
0	35,968	35,968	35,968	35,968	35,968	31,968	18,944	-
0,2	35,968	35,968	35,968	35,968	35,008	22,208	7,712	-
0,4	35,968	35,968	35,968	28,512	15,648	4,576	0,384	-
0,6	23,616	23,328	19,968	10,56	4,64	0,608	0,192	-
0,8	9,28	8,864	7,456	4,32	0,544	0,512	0,192	-
1	4,704	4,48	3,328	0,448	0,64	0,48	0	0,160[-91]
1,2	0,704	0,704	0,704	0,672	0,608	0,416	0	0,16[-92]
1,4	0,704	0,704	0,704	0,704	0,608	0,384	0	0,224[-95]
1,6	0,704	0,704	0,704	0,672	0,608	0,384	0	0,256[-97]
1,8	0,736	0,736	0,704	0,672	0,576	0,32	0	0,288[-99]
2	0,704	0,704	0,704	0,64	0,512	0	0	0,352[-103]
2,2	0,704	0,704	0,704	0,64	0,48	0	0	0,352[-105]
2,4	0,736	0,736	0,704	0,64	0,448	0	0	0,416[-108]
2,6	0,704	0,704	0,704	0,608	0,384	0	0	0,384[-110]
2,8	0,64	0,64	0,608	0,512	0	0	0	0,384[-113]
3	0,608	0,608	0,608	0,48	0	0	0	0,416[-117]
3,2	0,608	0,608	0,576	0	0	0	0	0,480[-121]
3,4	0	0	0	0	0	0	0	-



Obrázek 66: VDSL2 UPSTREAM - PORT9.

Tabulka 32: VDSL2 downstream přenosové rychlosti na portu č. 8 v kombinaci s trasou a šumem.

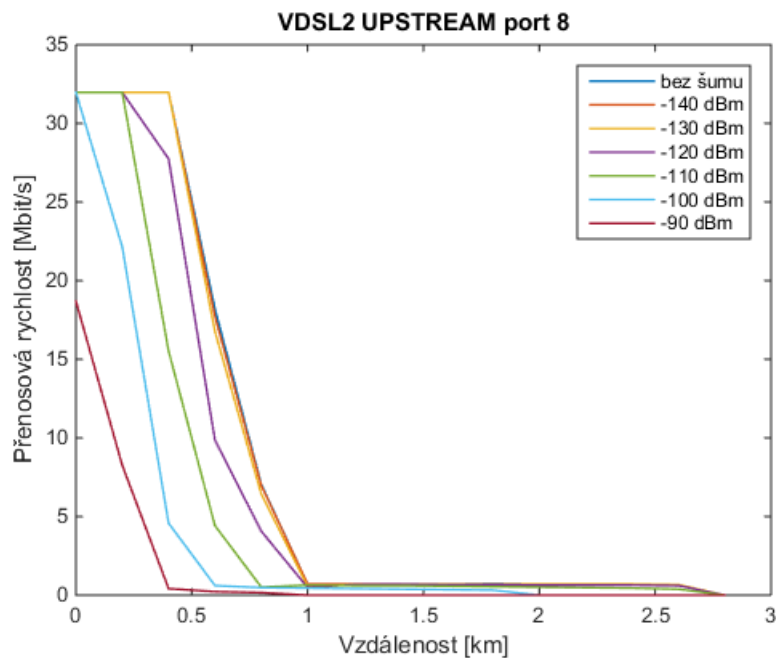
Název simulátoru - Spirent DLS-6900								
VDSL2 Port 8 DOWNSTREAM [Mbit/s]								
	šum[dBm/Hz]							
trasa [km]	bez šumu	-140	-130	-120	-110	-100	-90	přenosová rychlost při hraniční hodnotě šumu (rychlost[šum])
0	31,968	31,968	31,968	31,968	31,968	31,968	24,224	-
0,2	31,968	31,968	31,968	31,968	31,968	31,968	11,552	-
0,4	31,968	31,968	31,968	31,968	31,968	18,048	5,952	-
0,6	31,968	31,968	31,968	29,312	22,208	11,456	3,296	-
0,8	29,248	29,088	28,256	24,032	14,592	6,528	1,312	-
1	24,032	23,904	22,912	17,512	9,856	4,064	0	0,672[-91]
1,2	20,896	20,48	18,08	12,352	6,464	2,368	0	0,192[-92]
1,4	17,12	16,512	13,952	9,088	4,544	1,44	0	0,288[-95]
1,6	13,28	12,64	10,528	6,592	3,072	0,768	0	0,224[-97]
1,8	10,528	9,984	8,064	4,96	2,144	0,256	0	0,256[-100]
2	7,776	7,392	5,888	3,52	1,376	0	0	0,256[-103]
2,2	5,984	5,664	4,48	2,592	0,832	0	0	0,192[-105]
2,4	4,544	4,32	3,456	1,888	0,48	0	0	0,288[-108]
2,6	3,36	3,232	2,56	1,344	0,192	0	0	0,192[-110]
2,8	0	0	0	0	0	0	0	-



Obrázek 67: VDSL2 DOWNSTREAM - PORT 8.

Tabulka 33: VDSL2 upstream přenosové rychlosti na portu č. 8 v kombinaci s trasou a šumem.

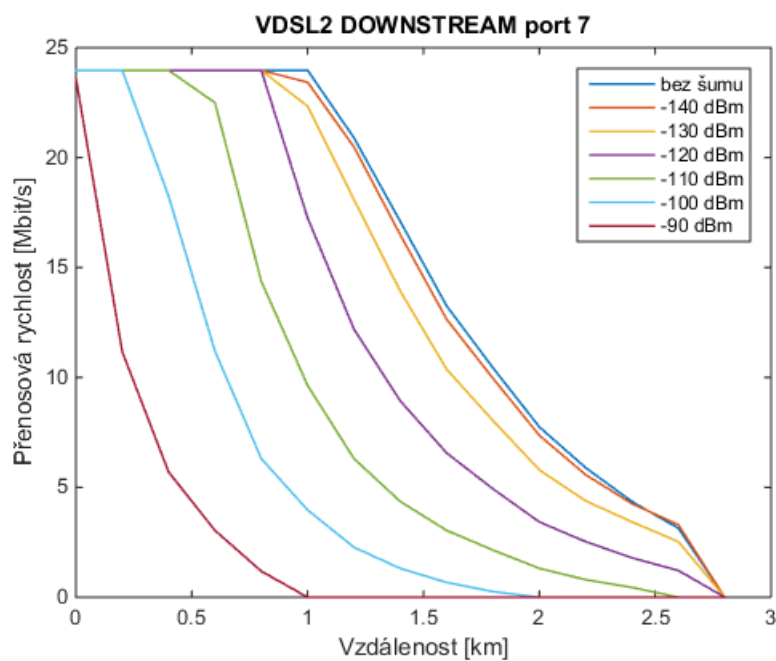
Název simulátoru - Spirent DLS-6900								
VDSL2 Port 8 UPSTREAM [Mbit/s]								
	šum[dBm/Hz]							
trasa [km]	bez šumu	-140	-130	-120	-110	-100	-90	přenosová rychlost při hraniční hodnotě šumu (rychlost[šum])
0	31,968	31,968	31,968	31,968	31,968	31,968	18,688	-
0,2	31,968	31,968	31,968	31,968	31,968	22,144	8,256	-
0,4	31,968	31,968	31,968	27,744	15,52	4,576	0,416	-
0,6	18,208	17,728	16,768	9,856	4,416	0,608	0,224	-
0,8	7,04	6,976	6,432	4,064	0,512	0,48	0,16	-
1	0,704	0,704	0,544	0,48	0,64	0,448	0	0,16[-91]
1,2	0,672	0,704	0,672	0,672	0,608	0,416	0	0,160[-92]
1,4	0,704	0,704	0,704	0,704	0,608	0,384	0	0,224[-95]
1,6	0,704	0,704	0,704	0,672	0,576	0,352	0	0,288[-97]
1,8	0,736	0,704	0,704	0,672	0,544	0,32	0	0,32[-100]
2	0,704	0,704	0,704	0,64	0,512	0	0	0,352[-103]
2,2	0,704	0,704	0,704	0,64	0,48	0	0	0,352[-105]
2,4	0,704	0,704	0,704	0,64	0,448	0	0	0,416[-108]
2,6	0,672	0,672	0,672	0,608	0,384	0	0	0,384[-110]
2,8	0	0	0	0	0	0	0	-



Obrázek 68: VDSL2 UPSTREAM - PORT8.

Tabulka 34: VDSL2 downstream přenosové rychlosti na portu č. 7 v kombinaci s trasou a šumem.

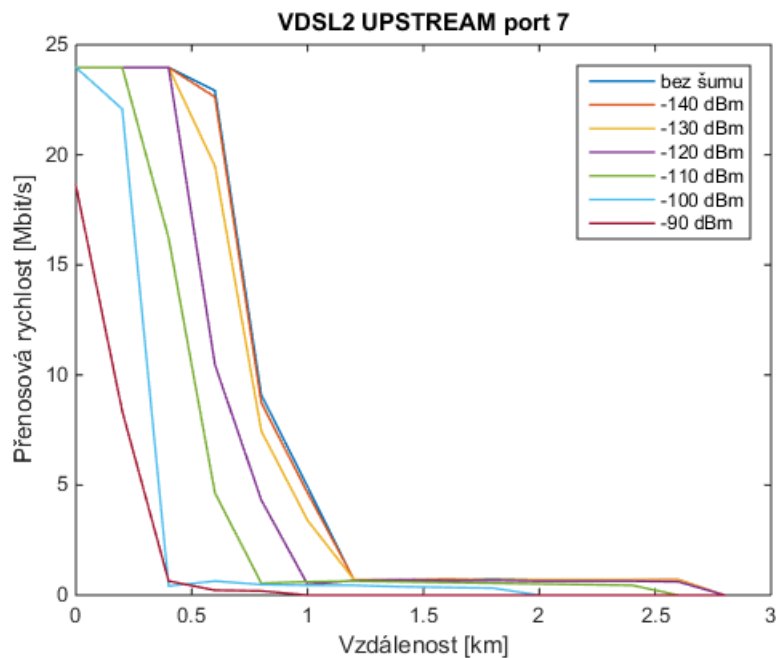
Název simulátoru - Spirent DLS-6900								
VDSL2 Port 7 DOWNSTREAM [Mbit/s]								
	šum[dBm/Hz]							
trasa [km]	bez šumu	-140	-130	-120	-110	-100	-90	přenosová rychlost při hraniční hodnotě šumu (rychlost[šum])
0	23,968	23,968	23,968	23,968	23,968	23,968	23,616	-
0,2	23,968	23,968	23,968	23,968	23,968	23,968	11,168	-
0,4	23,968	23,968	23,968	23,968	23,968	18,24	5,696	-
0,6	23,968	23,968	23,968	23,968	22,496	11,2	3,04	-
0,8	23,968	23,968	23,968	23,968	14,368	6,304	1,184	-
1	23,968	23,424	22,336	17,248	9,632	3,968	0	0,576[-91]
1,2	20,896	20,48	18,08	12,192	6,304	2,272	0	0,160[-92]
1,4	17,088	16,48	13,92	8,928	4,352	1,312	0	0,288[-95]
1,6	13,248	12,64	10,368	6,56	3,04	0,672	0	0,192[-97]
1,8	10,432	9,952	8,032	4,928	2,144	0,256	0	0,256[-100]
2	7,744	7,36	5,792	3,424	1,312	0	0	0,256[-103]
2,2	5,888	5,568	4,384	2,528	0,8	0	0	0,288[-106]
2,4	4,352	4,256	3,424	1,792	0,448	0	0	0,192[-108]
2,6	3,136	3,296	2,528	1,216	0	0	0	0,256[-111]
2,8	0	0	0	0	0	0	0	-



Obrázek 69: VDSL2 DOWNSTREAM - PORT 7.

Tabulka 35: VDSL2 upstream přenosové rychlosti na portu č. 7 v kombinaci s trasou a šumem.

Název simulátoru - Spirent DLS-6900								
VDSL2 Port 7 UPSTREAM [Mbit/s]								
	šum[dBm/Hz]							
trasa [km]	bez šumu	-140	-130	-120	-110	-100	-90	přenosová rychlost při hraniční hodnotě šumu (rychlost[šum])
0	23,968	23,968	23,968	23,968	23,968	23,968	18,592	-
0,2	23,968	23,968	23,968	23,968	23,968	22,08	8,352	-
0,4	23,968	23,968	23,968	23,968	16,224	0,416	0,64	-
0,6	22,912	22,624	19,488	10,464	4,64	0,64	0,224	-
0,8	9,088	8,726	7,456	4,32	0,544	0,48	0,192	-
1	4,928	4,64	3,392	0,48	0,608	0,448	0	0,16[-91]
1,2	0,672	0,704	0,704	0,672	0,64	0,448	0	0,160[-92]
1,4	0,704	0,704	0,704	0,704	0,608	0,384	0	0,224[-95]
1,6	0,704	0,736	0,704	0,672	0,576	0,352	0	0,256[-97]
1,8	0,736	0,704	0,704	0,672	0,544	0,32	0	0,32[-100]
2	0,704	0,704	0,704	0,64	0,512	0	0	0,352[-103]
2,2	0,704	0,704	0,704	0,64	0,48	0	0	0,384[-106]
2,4	0,704	0,704	0,704	0,64	0,448	0	0	0,384[-108]
2,6	0,704	0,704	0,672	0,608	0	0	0	0,416[-111]
2,8	0	0	0	0	0	0	0	-

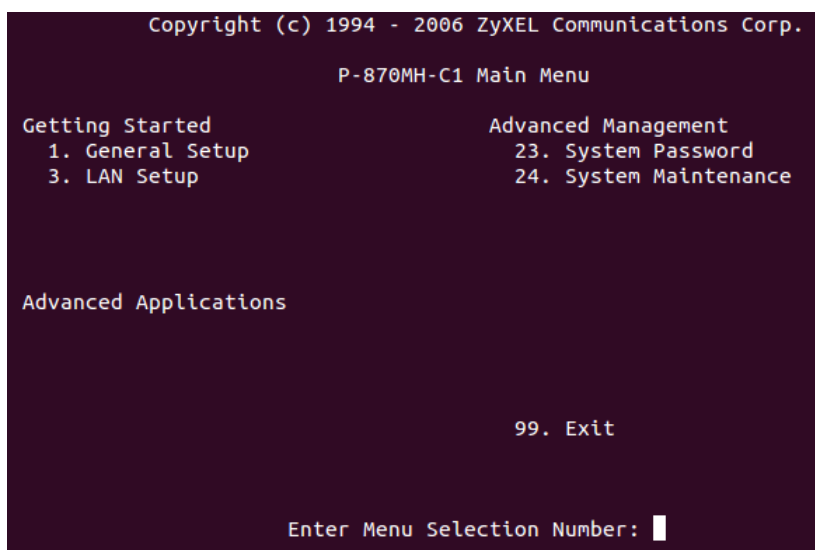


Obrázek 70: VDSL2 UPSTREAM - PORT 7.

	Naměřené rychlosti [Mbit/s]											
Porty	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Downstream	0,480	0,960	1,952	3,968	7,968	16,352	23,968	31,968	45,408	59,968	63,968	63,968
Upstream	0,480	0,960	1,952	3,952	7,968	16,352	23,968	31,968	35,968	35,968	35,968	35,968

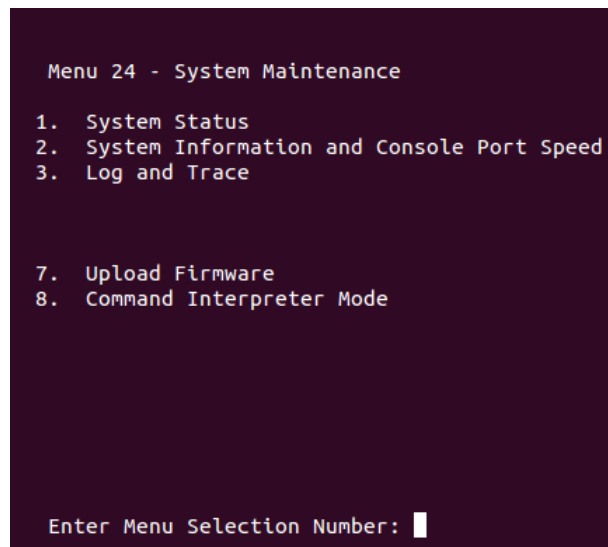
Tabulka 36: Naměřené přenosové rychlosti u jednotlivých VDSL2 portů.

Pro zjištění přenosových rychlostí bylo nutné nejprve propojit VDSL2 modem s PC. Na PC musela být nastavena taková IP adresa, aby se PC nacházelo ve stejné síti jako modem. Poté jsem se pomocí programu Putty přes telnet připojil k modemu (ip adresa: 10.2.6.1). Po zadání hesla **1234** jsem se úspěšně přihlásil. V nastavení modemu jsem zvolil možnost **System Maintenance** (obrázek č.71) a následně možnost **Command Interpreter Mode**, což je ukázáno na obrázku č.72.



Obrázek 71: Main Menu VDSL2 modemu .

Tím jsem se dostal do příkazové řádky modemu, kde jsem si pomocí příkazu **<vdsl status>** zjistil informace o přenosových rychlostech. Přesněji se jednalo o parametr **DS Payload Rate**(downstream) a **US Payload Rate**(upstream). Tyto důležité parametry jsou zvýrazněny na obrázku č.73.



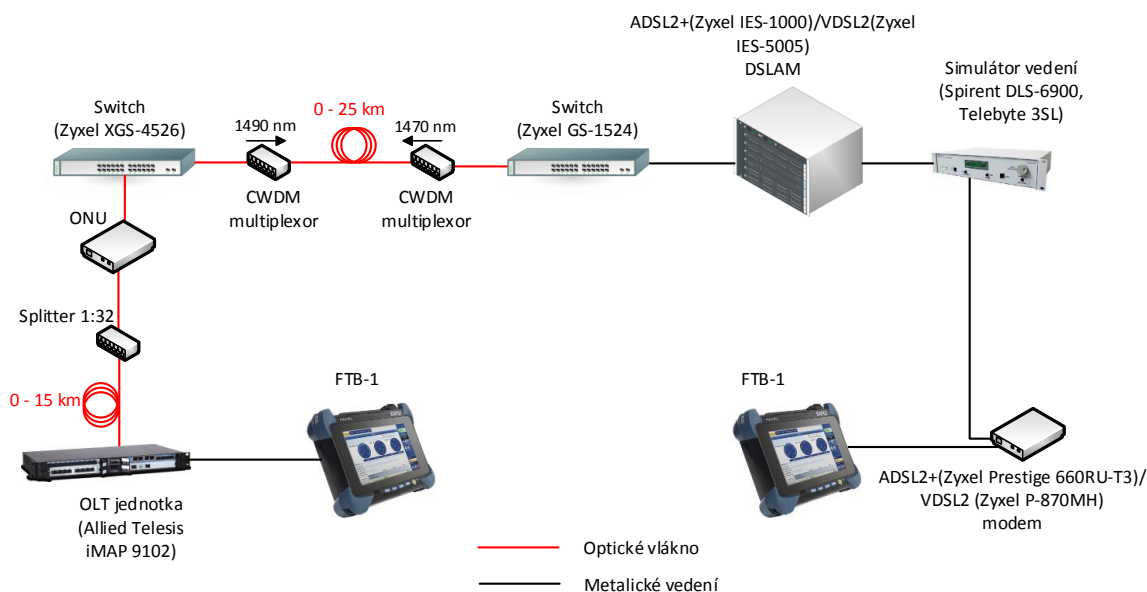
Obrázek 72: System Maintenance VDSL2 modemu .

```
ras> vdsl status
=====
VDSL DSP Firmware Version: 1.60.00-A1
VDSL Line State:      DATA      Total Transmit Power:13.9 dB
DS Payload Rate:  63968kbps    Local Attenuation:   0.0 dB
US Payload Rate:  35968kbps    Local SNR Margin:   50.0 dB
=====
COE Parameters:
Remote Transmit Power:  0.0 dB
Remote Init SNR:       0.0 dB
Remote SNR Margin:     0.0 dB
Remote Attenuation:    0.0 dB
=====
Counters since last reset
RX Packet Count:      0    TX Packet Count:      0
RX Error Packet Count: 0
Local FEC Error:      0    Remote FEC Error:      0
Local CRC Error:      0    Remote CRC Error:      0
Local SEF Error:      0    Remote SEF Error:      0
Local LOS Error:      0    Remote LOS Error:      0
=====
Failure Condition
Overall:              0
Watch Dog Timer:      83
Local LOS:            0    Remote LOS:            0
Local SEF:            0    Remote SEF:            0
Local NCDI:           0    Remote NCDI:           0
Local LCDI:           0    Remote LCDI:           0
=====
ras> █
```

Obrázek 73: Výpis z terminálu modemu VDSL2 při zadání příkazu VDSL STATUS.

10 Testování integrity sítě

Před testováním Triple play služeb bylo potřeba otestovat integritu sítě. Pro tyto účely byly využity testy RFC 2544, a ITU-T Y.1564 EtherSAM. Měření probíhalo na vytvořené síti podle obrázku. Pro testování byly vytvořeny jednotlivé konfigurace sítě, které se lišily pouze délkou optické, metalické trasy a technologií xDSL (ADSL2+, VDSL2). Navíc u simulace metalického vedení došlo i k různému nastavení AWGN šumu. Při kombinaci těchto parametrů vzniklo několik variant.



Obrázek 74: Schéma zapojení při ověření integrity.

10.1 RFC 2544

Metoda testování RFC 2544 vznikla už v roce 1999 organizací IETF (Internet Engineering Task Force). Slouží pro testování na L2 (Ethernet) a L3 (IP) vrstvách. Skládá se celkem ze 4 testů, které ověřují propustnost, ztrátovost, zpoždění a zatížitelnost síťových zařízení pro různé velikosti rámců (64, 128, 256, 512, 768, 1024, 1280, a 1518 bytů). [16]

Propustost

Test propustnosti je proveden tak, že na testované síťové zařízení je zasláno určité množství rámců o určité rychlosti a poté se sleduje počet přijatých rámců, jestliže počet zaslaných a počet přijatých rámců není roven, dojde ke snížení množství zaslaných rámců. Jakmile bude počet odeslaných a přijatých rámců roven, test se ukončí. Výsledná propustnost bude hodnota rychlosti nejrychlejšího proudu, při nichž nedošlo ke ztrátě ani jednoho rámce.[16]

Ztrátovost

Cílem testu je stanovit míru ztráty (v procentech) rámců v celém rozsahu rychlostí a velikostí rámců (64, 128, 256, 512, 768, 1024, 1280, a 1518 bytů). Při testu se vyšle proud rámců o určité rychlosti a následně jsou spočteny rámce, které jsou přenášeny testovaným zařízením. Ztrátovost je vypočtena v každé kombinaci (přenosová rychlost x velikost paketů) pomocí následující rovnice:

$$\frac{(\text{počet}_{VstupníchRámců} - \text{počet}_{VýstupníchRámců}) * 100}{\text{počet}_{VýstupníchRámců}} \quad (2)$$

Na začátku testu by měla rychlost vstupního proudu rámců odpovídat 100% rychlosti rozhraní média. Poté se proud rámců snižuje stále o 10 % celkové rychlosti média až do chvíle, kdy proběhnou po sobě dva testy, ve kterých nejsou ztraceny žádné rámce.[16] V diplomové práci jsou jen zobrazeny výsledky ztrátovosti, které byly získány při vstupu proudu o 100 % rychlosti rozhraní média (100Mbit/s).

Zpoždění

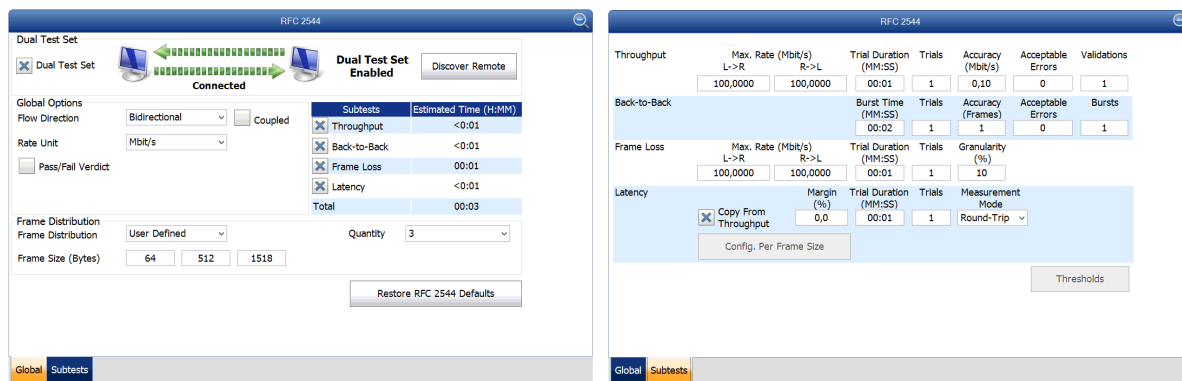
Cílem tohoto měření je zjistit dobu od odeslání rámce až po jeho přijetí, což nás informuje o tom, jak dlouho rámec cestuje sítí. Nejprve je při testu důležité zjistit průchodnost zařízení pro jednotlivé velikosti rámce. Poté dojde k zaslání proudu rámců. Proud by měl trvat 120 sekund. V této sekvenci se nachází rámec opatřený časovou značkou A, ve které se nachází informace o času odeslání. Přijímač časovou značku A rozpozná a zaznamená čas, kdy si této značky všiml (časová značka B). Rozdíl časů z časových značek B a A je výslednou hodnotou zpoždění. Doporučuje se měření 20x opakovat a poté z těchto hodnot spočítat průměr. [16]

Zatížitelnost

Při testu je na vstup testovaného zařízení vygenerován burst (množství rámců s minimálními mezerami mezi sebou) a na jeho výstupu je sledován počet rámců v burstu. Pokud je počet rámců shodných na vstupu i na výstupu testovaného zařízení, je zvýšen počet rámců ve vygenerovaném burstu a test se opět opakuje. V případě, že počet rámců na výstupu je menší než počet rámců ve vygenerovaném burstu je počet rámců ve vygenerovaném burstu snížen a test proběhne znovu. Konečná hodnota zatížitelnosti je definována jako počet rámců v nejdelším burstu, který projde zařízením bez ztráty rámce. Jednotlivý test o různé délce burstu musí trvat nejméně 2 sekundy a a doporučuje se jej opakovat 50x. Na základě těchto 50 hodnot je výsledek zprůměrován. [16]

Testování hybridní sítě probíhalo při zapojení na obrázku č.74. Test RFC 2544 byl vykonán pro velikost rámců 64, 512 a 1518 bytů. Vstupní parametry pro hybridní síť s VDSL2 a ADSL2+ byly totožné. Tyto parametry je možno si prohlédnout na obrázku č. 75. Doba trvání

jednoho testu se pohybovala kolem 25 minut.



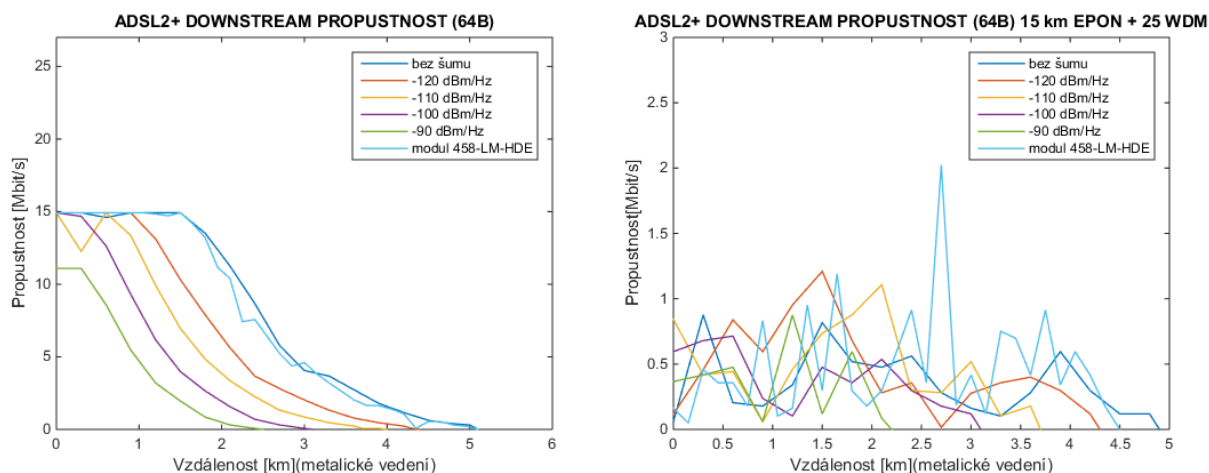
Obrázek 75: Nastavení testu RFC 2544.

10.1.1 RFC 2544 pro hybridní síť EPON/CWDM/ADSL2+

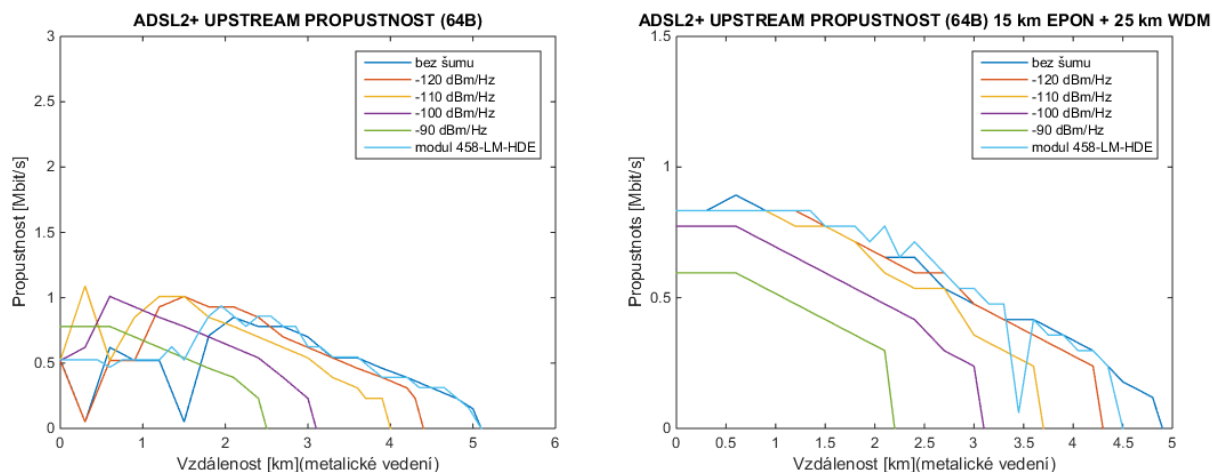
Na obrázcích níže jsou zobrazeny v grafech naměřené hodnoty propustnosti, ztrátovosti, zpoždění a zatížitelnosti. Měření proběhlo na portu č. 10 s přenosovou rychlostí 26 Mbit/s v sestupném směru a 1,2 Mbit/s ve vzestupném směru. Pro metalickou trasu byl využit simulátor vedení Telebyte 458-3SL(modul 458-LM-HDE) a Spirent DLS6900 s nastavitelným vložitelným šumem. Pro testování RFC6349 byly použity hodnoty šumu v rozmezí -120 dBm/Hz až -90 dBm/Hz.

10.1.1.1 RFC 2544 - PROPUSTNOST - EPON/CWDM/ADSL2+

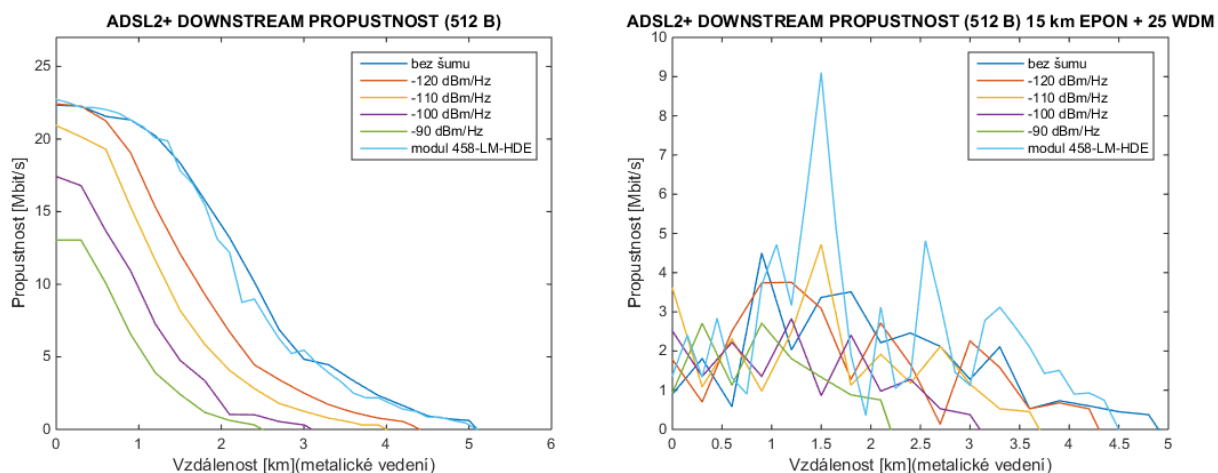
Na obrázcích níže jsou zobrazeny hodnoty propustnosti ADSL2+ pro downstream a upstream. Výsledky propustnosti jsou prezentované na L2 vrstvě. Nejvyšší hodnoty propustnosti byly změřeny při velikosti rámců 512 B a 1518 B. Při tomto nastavení byla zaznamenána hodnota kolem 23 Mbit/s bez připojené optické trasy v downstreamu. Naopak při velikosti paketu 64 B dosahovala propustnost nejvýše hodnoty 15 Mbit/s při stejném zapojení. Jak je z grafů patrné, tak se vzrůstající metalickou trasou a přidáním šumem klesala propustnost sítě. Velmi výrazným omezením propustnosti došlo pro připojení optické trasy do PON (15 km) a do WDM systému (25 km). Hodnoty propustnosti se velmi propadly a pohybovaly se kolem 5 Mbit/s. Mezi těmito výsledky již nebyla výrazná nepřímá úměra mezi propustností, metalickou trasou a šumem. Ve směru vzestupném (upstream) hodnoty zůstaly téměř beze změny, takže připojení optické trasy negativně ovlivnilo jen směr sestupný (downstream).



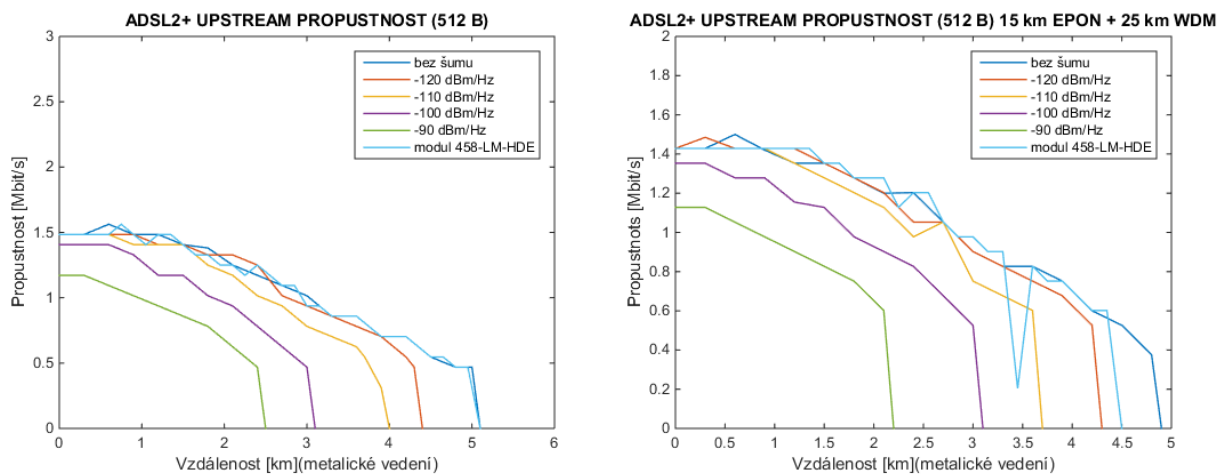
Obrázek 76: RFC 2544 ADSL2+ - PROPUSTNOST (64 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



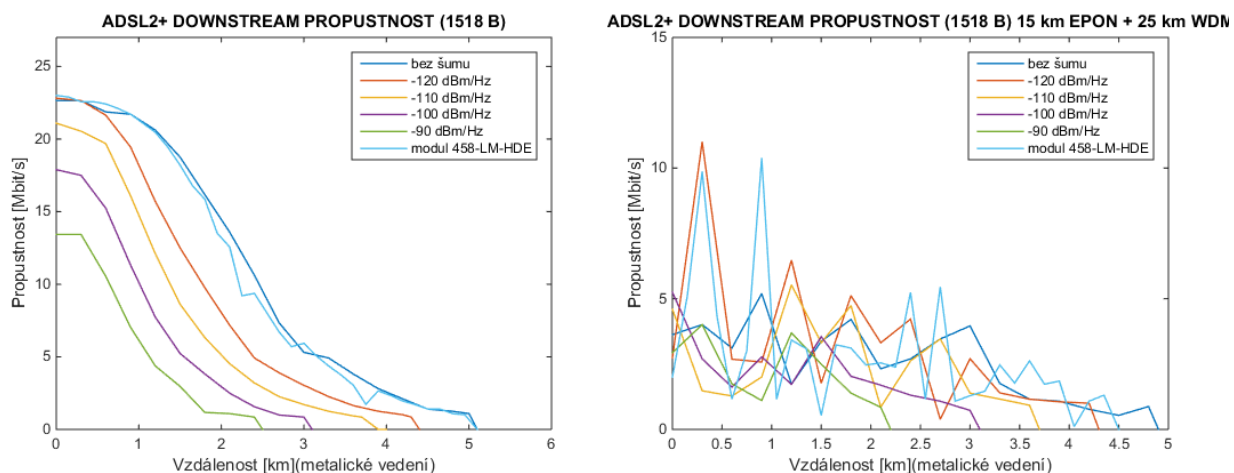
Obrázek 77: RFC 2544 ADSL2+ - PROPUSTNOST (64 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



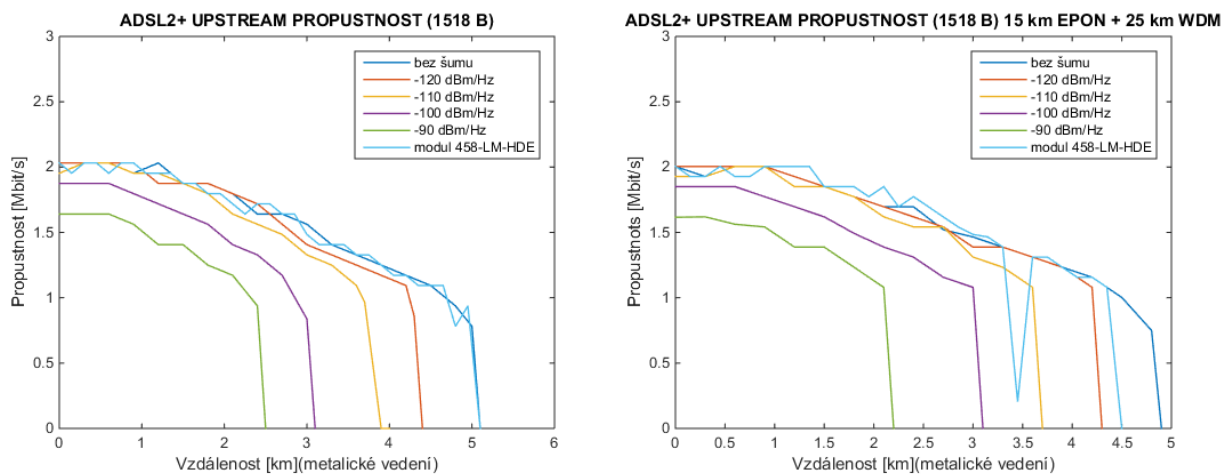
Obrázek 78: RFC 2544 ADSL2+ - PROPUSTNOST (512 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 79: RFC 2544 ADSL2+ - PROPUSTNOST (512 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



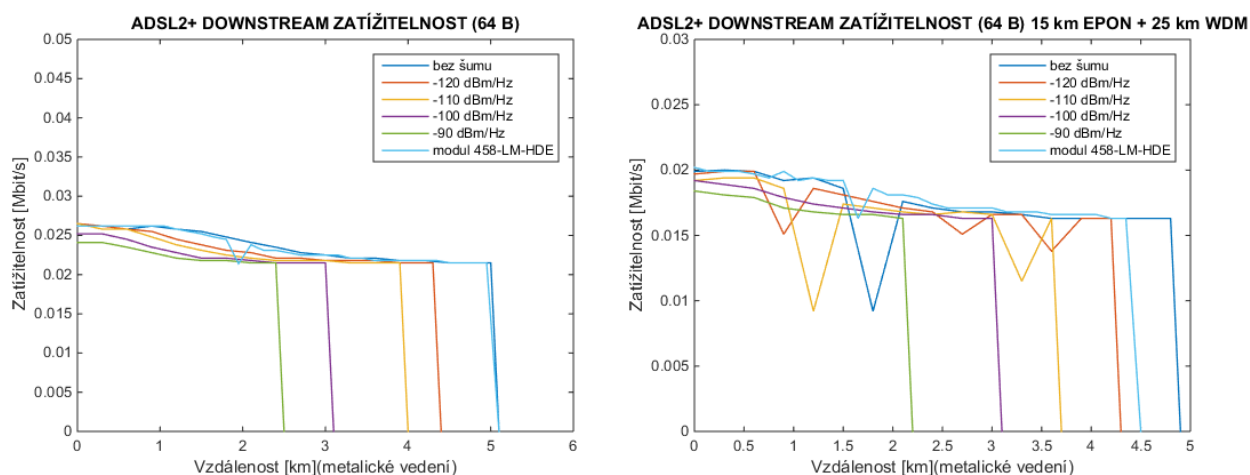
Obrázek 80: RFC 2544 ADSL2+ - PROPUSTNOST (1518 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



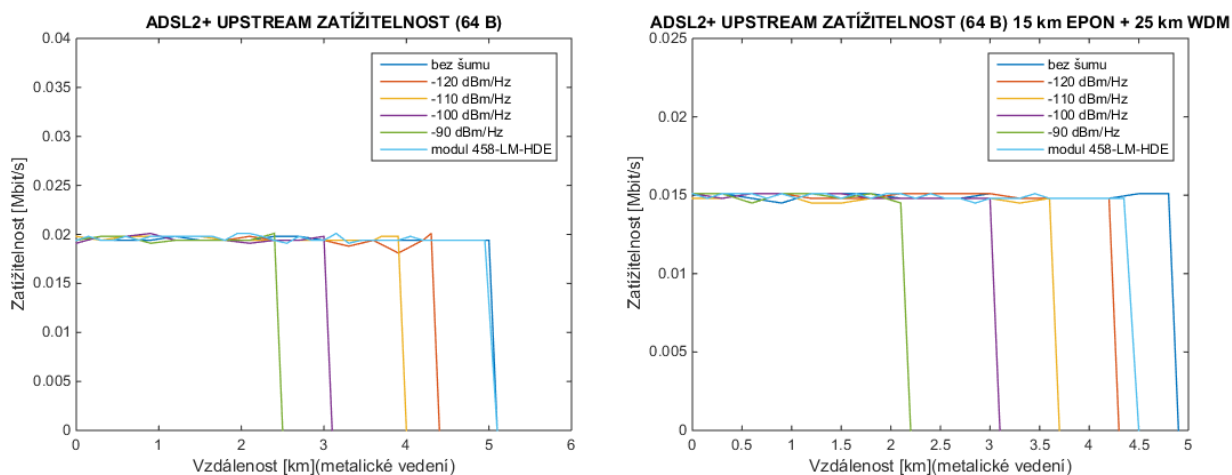
Obrázek 81: RFC 2544 ADSL2+ - PROPUSTNOST (1518 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.1.1.2 RFC 2544 - ZATÍŽITELNOST- EPON/CWDM/ADSL2+

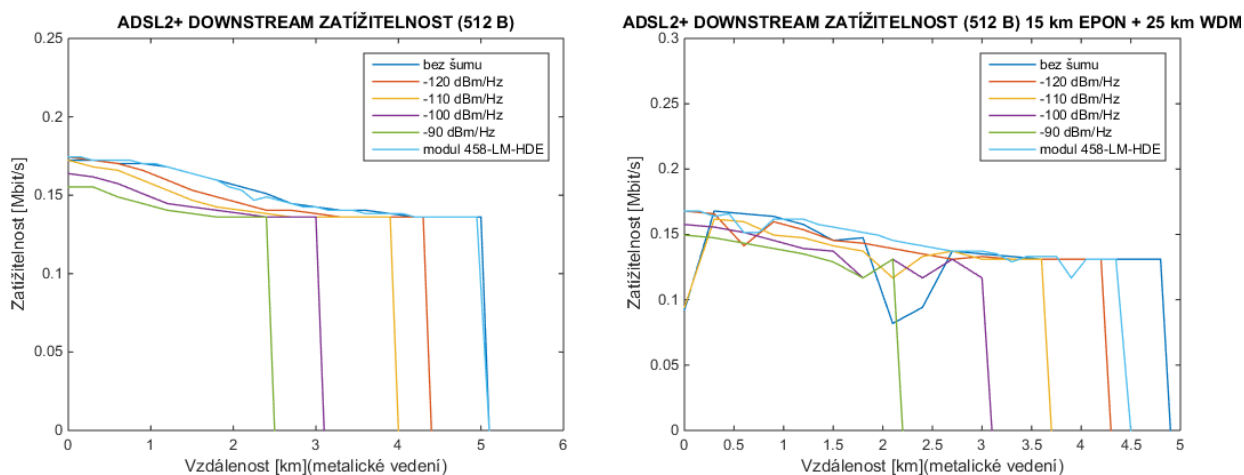
Zaznamenané hodnoty zatížitelnosti jsou velmi malé. Se vzrůstající velikostí rámců opět rostly hodnoty. Při 64 B se hodnota zatížitelnosti pohybovalo okolo 0,025 Mbit/s a při 512 bit narostla na 0,18 Mbit/s. Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo při 1518 bit a to 0.5 Mbit/s v downstreamu. Zatížitelnost v upstreamu byla dosti velmi podobná jako v downstreamu, akorát s tím rozdílem, že hodnoty v upstreamu byly lehce nižší. Jak je vidět z grafů, tak s připojenou optickou trasou hodnoty zatížitelnosti měli kolísavý charakter, ale stále se hodnoty pohybovaly kolem naměřených hodnot bez optické trasy v downstreamu. Naopak ve směru upstream hodnoty byly s optickou trasou stabilní, tak jako v případě bez optické trasy. Co se týče šumu, tak hodnoty byly ovlivněny mírně šumem jen v downstreamu. V upstreamu jen šum ovlivňoval maximální překlenutelnou vzdálenost metalického vedení.



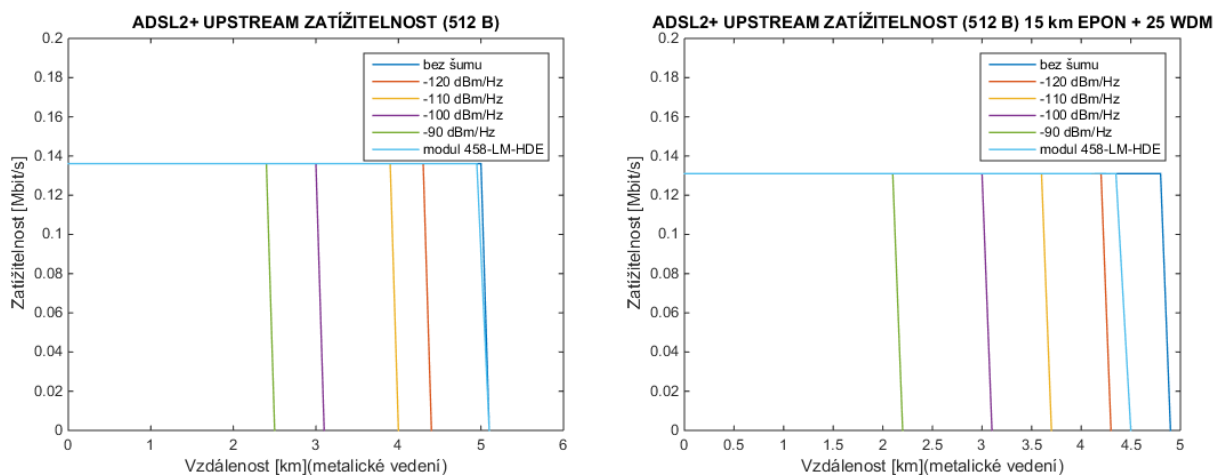
Obrázek 82: RFC 2544 ADSL2+ - ZATÍŽITELNOST (64 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidáním optickou trasou (vpravo).



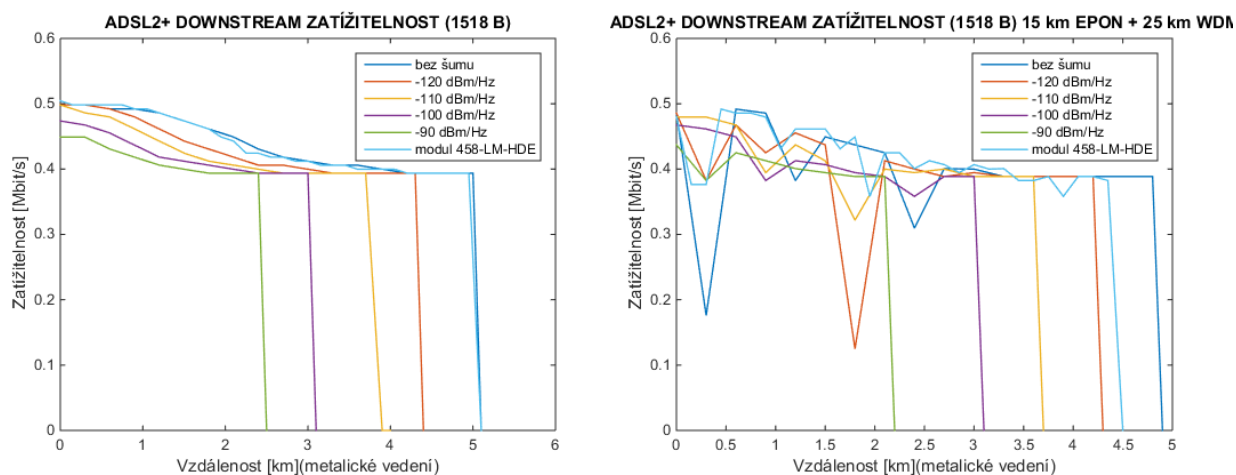
Obrázek 83: RFC 2544 ADSL2+ - ZATÍŽITELNOST (64 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



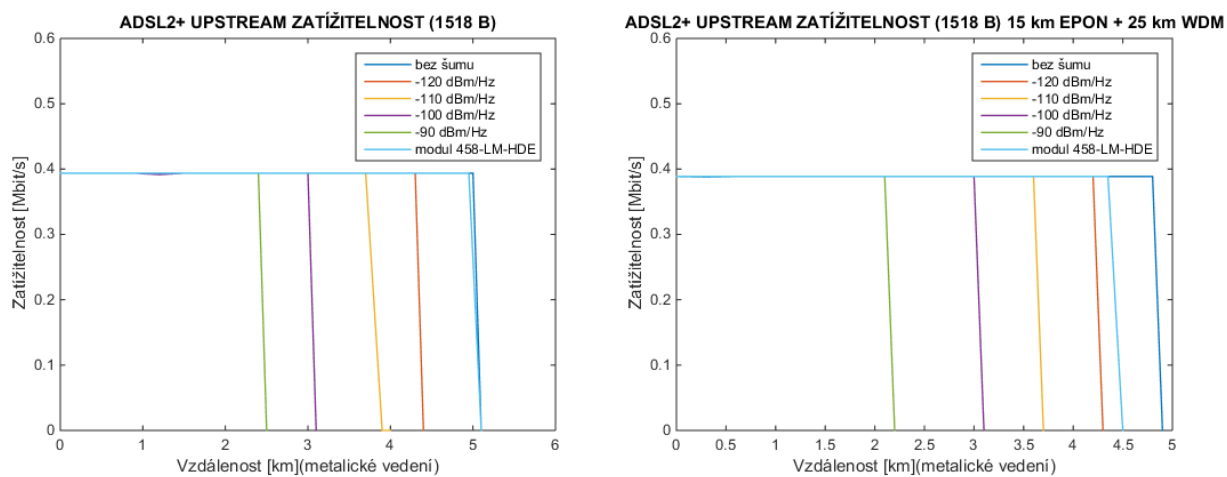
Obrázek 84: RFC 2544 ADSL2+ - ZATÍŽITELNOST (512 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 85: RFC 2544 ADSL2+ - ZATÍŽITELNOST (512 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



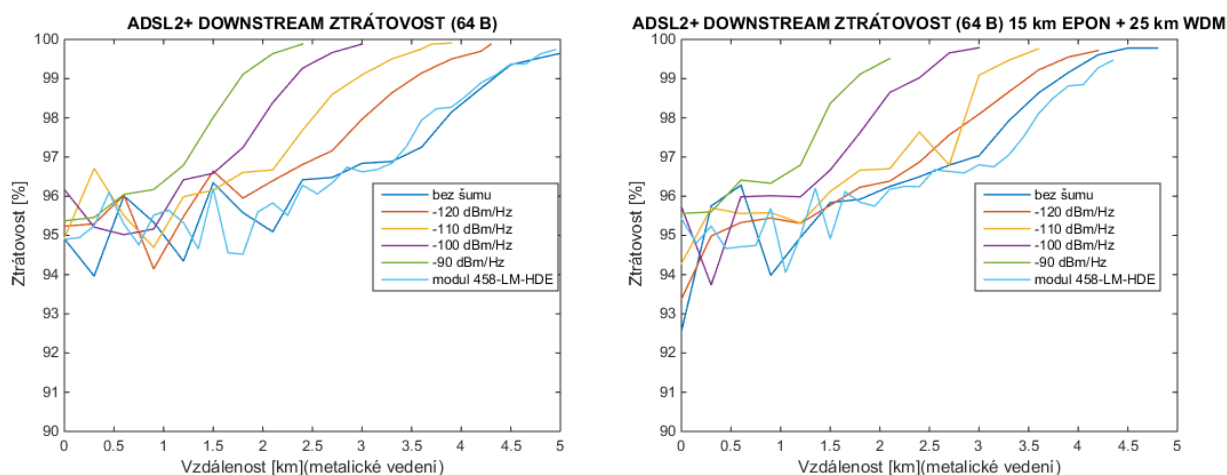
Obrázek 86: RFC 2544 ADSL2+ - ZATÍŽITELNOST (1518 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



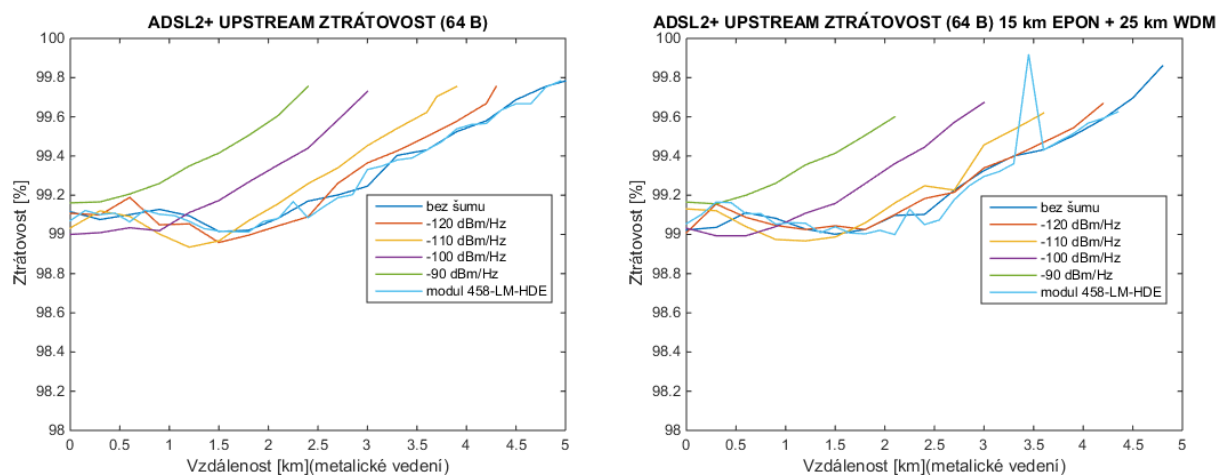
Obrázek 87: RFC 2544 ADSL2+ - ZATÍŽITELNOST (1518 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.1.1.3 RFC 2544 - ZTRÁTOVOST- EPON/CWDM/ADSL2+

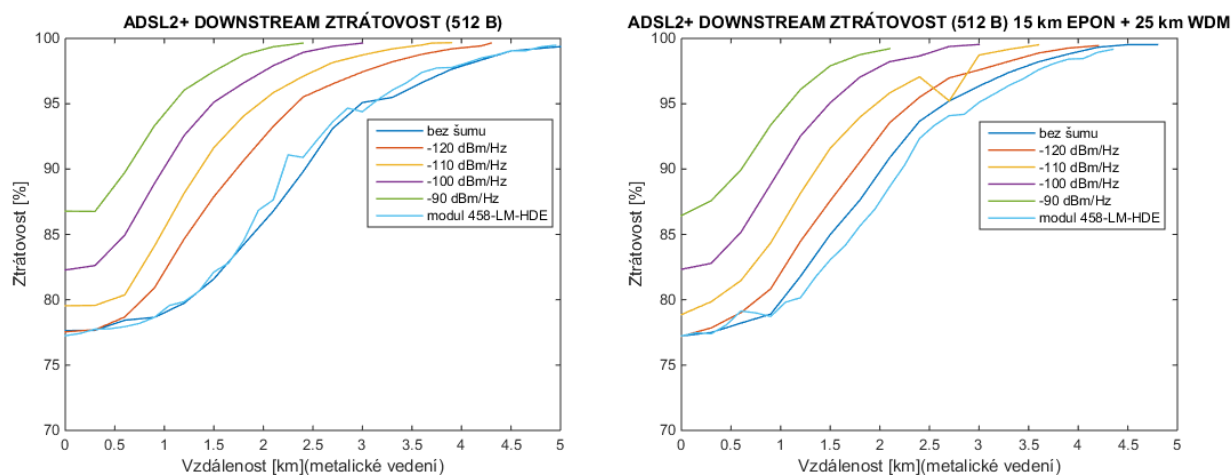
Hodnoty ztrátovosti jsou velmi vysoké, jelikož byly získány při vstupu proudu o 100 % rychlosti rozhraní média (100Mbit/s). Ztrátovost byla hlavně ovlivněna velikostí přidaného šumu do trasy. Hodnoty také byly ovlivněny velikostí rámců. Nižší hodnoty rámců vykazovaly horší výsledky. Při velikosti rámců 64 bit byly naměřeny hodnoty ztrátovosti nejvyšší. Pro velikosti 512 B a 1518 B byly výsledky lepší a velmi podobné. Nejnižší hodnota ztrátovosti byla zaznamenána kolem 77 % při 0 km metalické trase v downstreamu pro simulátor s modulem 458-LM-HDE a pro simulátor Spirent DLS 6900 s vypnutým přidaným šumem, ale i se šumem -120 dBm/Hz. Přidáním optické trasy se ztrátovost do 1 km metalického vedení pohybovala pod hranici 80 %, což neplatilo pro větší hodnoty přidaného šumu. Při překonání metalické trasy 1 km v downstreamu se ztrátovost začínala extrémně narůstat (bez šumu, -120 dBm/Hz, modul 458-LM-HDE). V upstreamu se ztrátovost lehce zvyšovala na základě přímé úměry. Přidáním optické trasy nemělo výrazný dopad na hodnoty ztrátovosti.



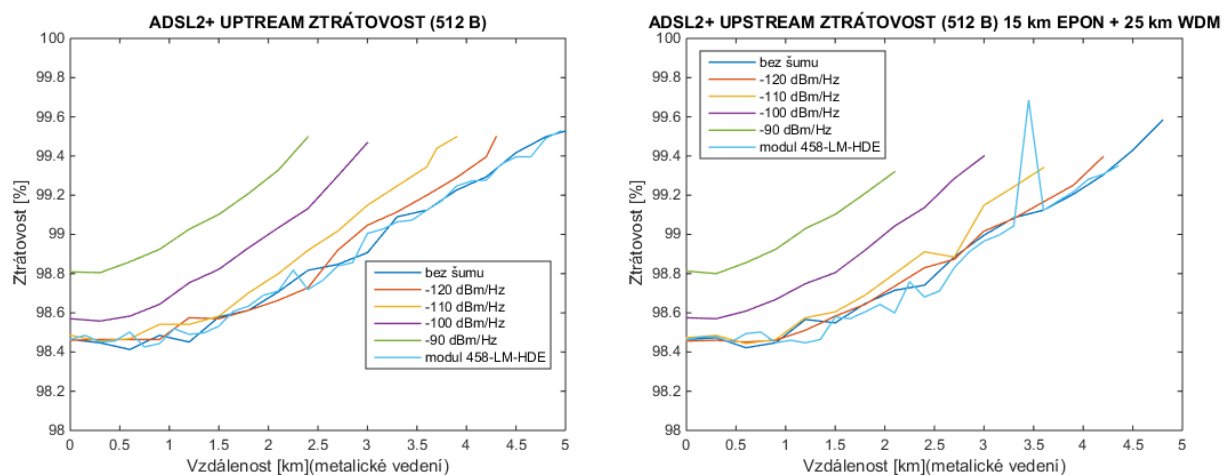
Obrázek 88: RFC 2544 ADSL2+ - ZTRÁTOVOST (64 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



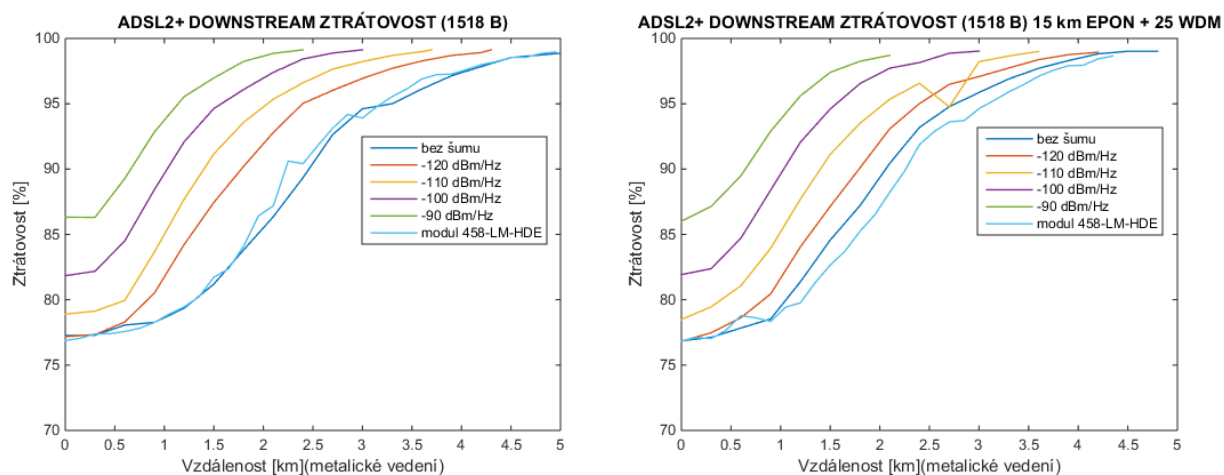
Obrázek 89: RFC 2544 ADSL2+ - ZTRÁTOVOST (64 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



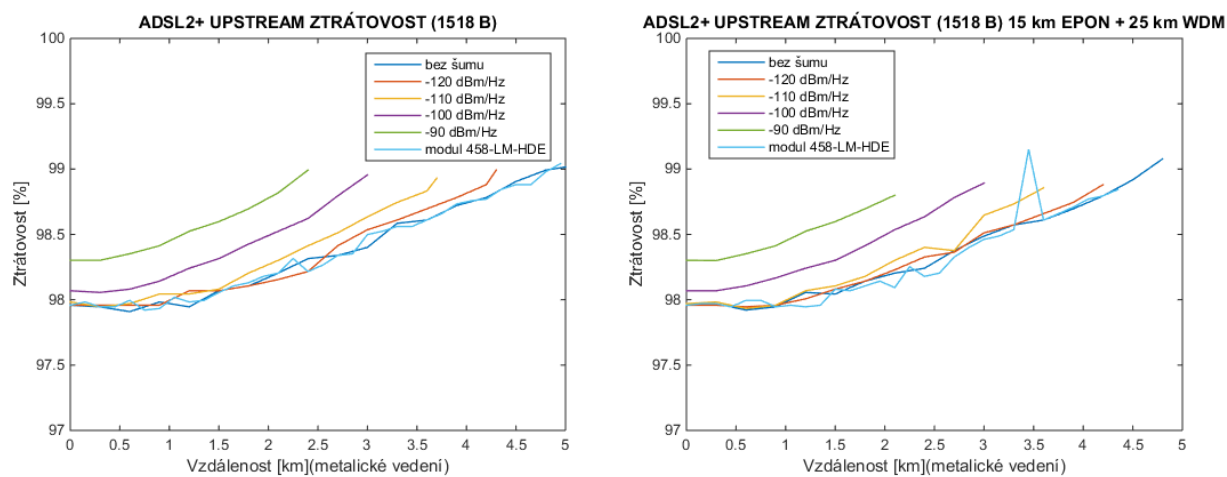
Obrázek 90: RFC 2544 ADSL2+ - ZTRÁTOVOST (512 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 91: RFC 2544 ADSL2+ - ZTRÁTOVOST (512 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



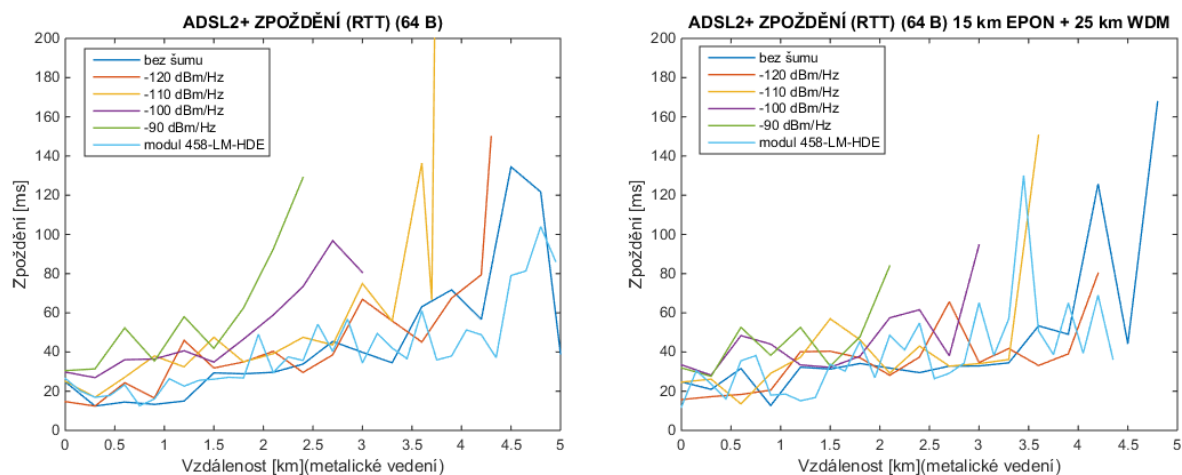
Obrázek 92: RFC 2544 ADSL2+ - ZTRÁTOVOST (1518 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



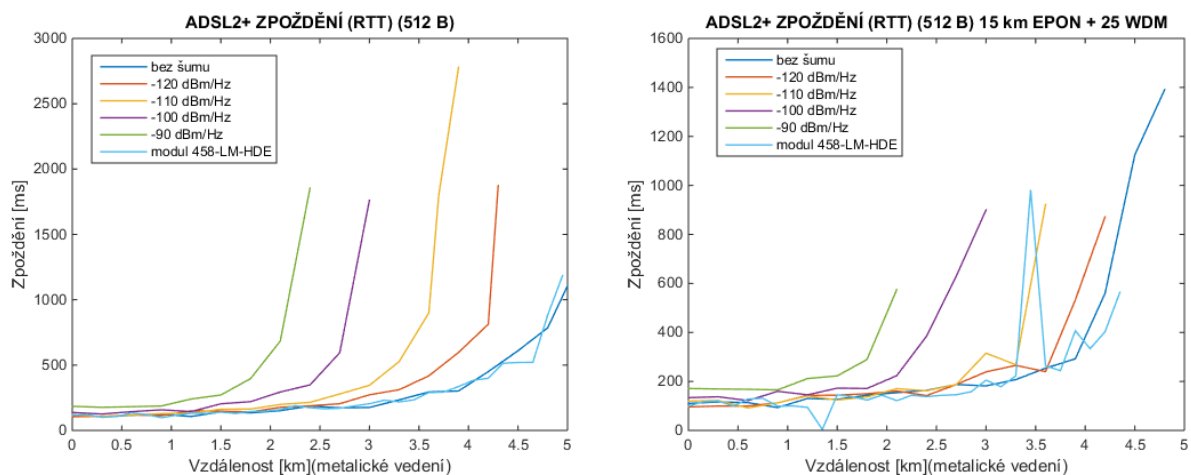
Obrázek 93: RFC 2544 ADSL2+ - ZTRÁTOVOST (1518 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.1.1.4 RFC 2544 - ZPOŽDĚNÍ- EPON/CWDM/ADSL2+

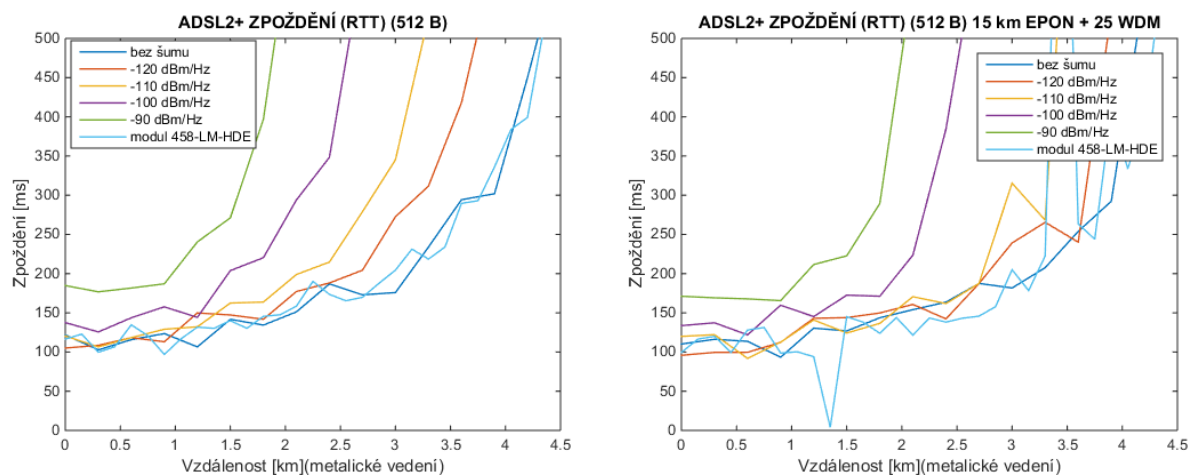
Změřené hodnoty zpoždění zde reprezentují obousměrné zpoždění (RTT - Round-Trip Time). Z naměřených výsledků je patrné, že hodnoty zpoždění závisely na délkách paketů, respektive s rostoucí velikostí paketů roste i velikost zpoždění. Například při 64 B bylo změřeno nejnižší zpoždění kolem hranice 20 ms, při 512 B přibližně 105 ms a při 1518 B 320 ms. Hodnoty zpoždění se výrazně neměnily po připojení optické trasy, takže RTT zpoždění záviselo zejména na délce simulované metalické trasy a na hodnotě přidaného šumu. Občas hraniční délka, při které se modem dokázal ještě připojit, nebyla vždy naprosto stejná, ve srovnání s optickou trasou a bez. Z tohoto důvodu byly změřeny navíc některé konfigurace (většinou ± 100 m), které se s optickou trasou nebo bez optické trasy nepodařilo naměřit. Tato měření navíc se projevují v grafu vysokou hodnotou zpoždění.



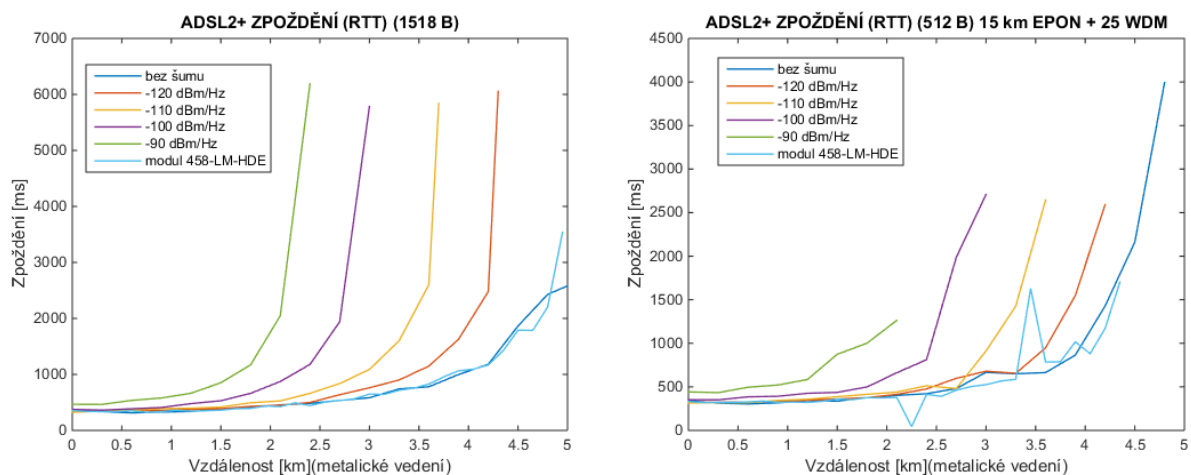
Obrázek 94: RFC 2544 ADSL2+ - ZPOŽDĚNÍ (64 B) - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



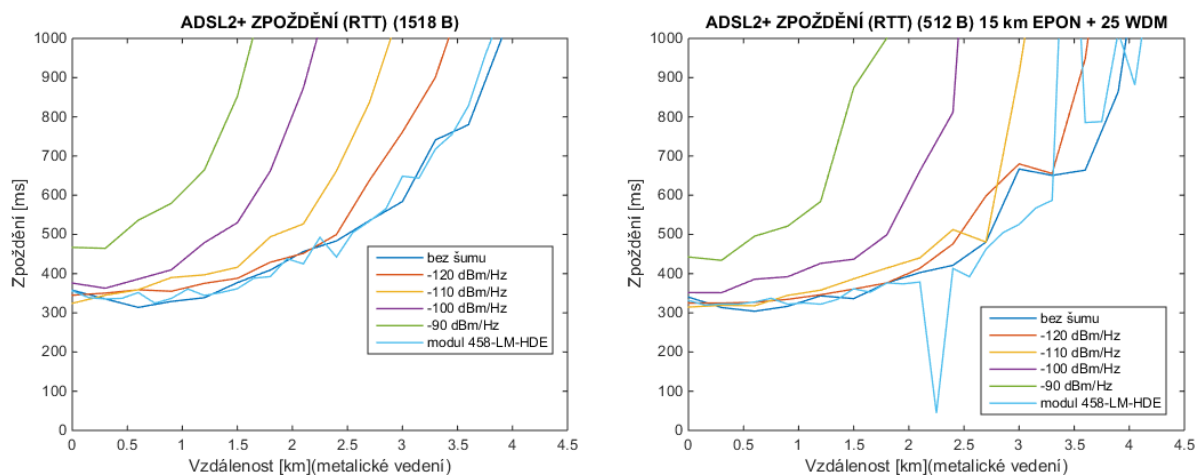
Obrázek 95: RFC 2544 ADSL2+ - ZPOŽDĚNÍ (512 B) - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 96: RFC 2544 ADSL2+ - ZPOŽDĚNÍ (512 B) - Výřez do 500 ms- bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 97: RFC 2544 ADSL2+ - ZPOŽDĚNÍ (1518 B) - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



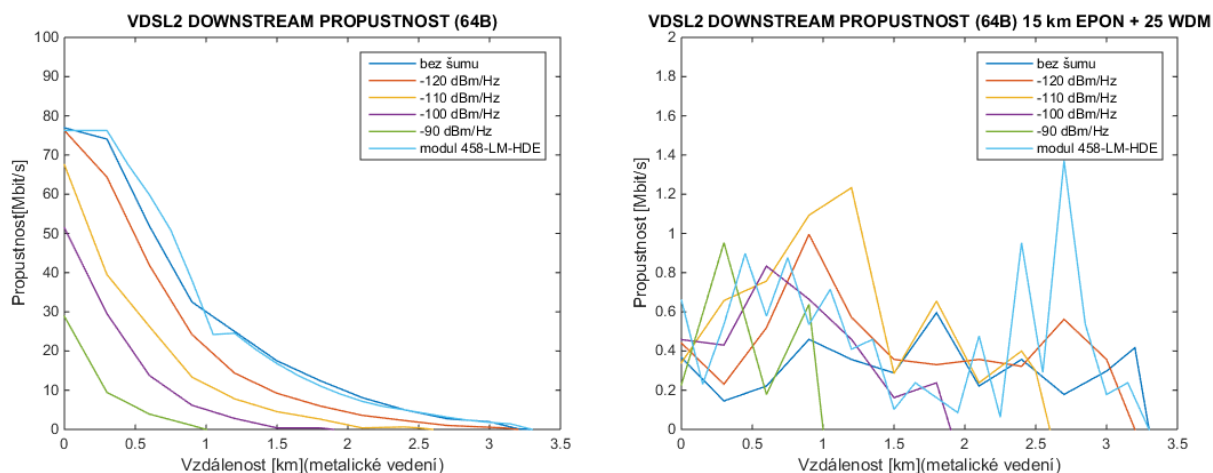
Obrázek 98: RFC 2544 ADSL2+ - ZPOŽDĚNÍ (1518 B) - Výřez do 1000 ms - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.1.2 RFC 2544 pro hybridní síť EPON/CWDM/VDSL2

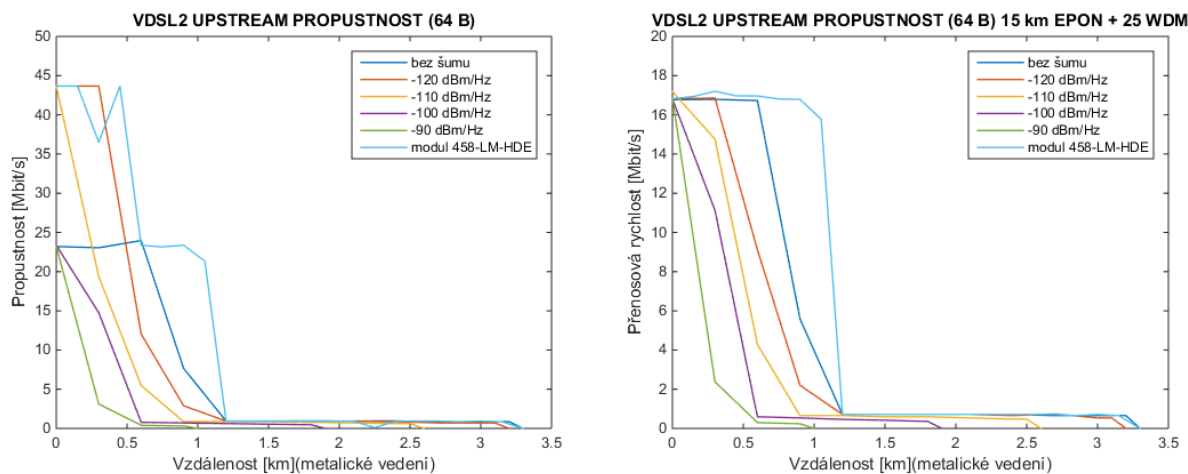
Na obrázcích níže jsou zobrazeny v grafech naměřené hodnoty propustnosti, ztrátovosti, zpoždění a zatížitelnosti. Měření proběhlo na portu č. 12 s přenosovou rychlostí 63,968 Mbit/s v sestupném směru a 35,968 Mbit/s ve vzestupném směru (změřeno modemem). Pro metalickou trasu byl využit simulátor vedení Telebyte 458-3SL(modul 458-LM-HDE) a Spirent DLS6900 s nastavitelným vložitelným šumem. Pro testování RFC6349 byly použity hodnoty šumu v rozmezí -120 dBm/Hz až -90 dBm/Hz.

10.1.2.1 RFC 2544 - PROPUSTNOST - EPON/CWDM/VDSL2

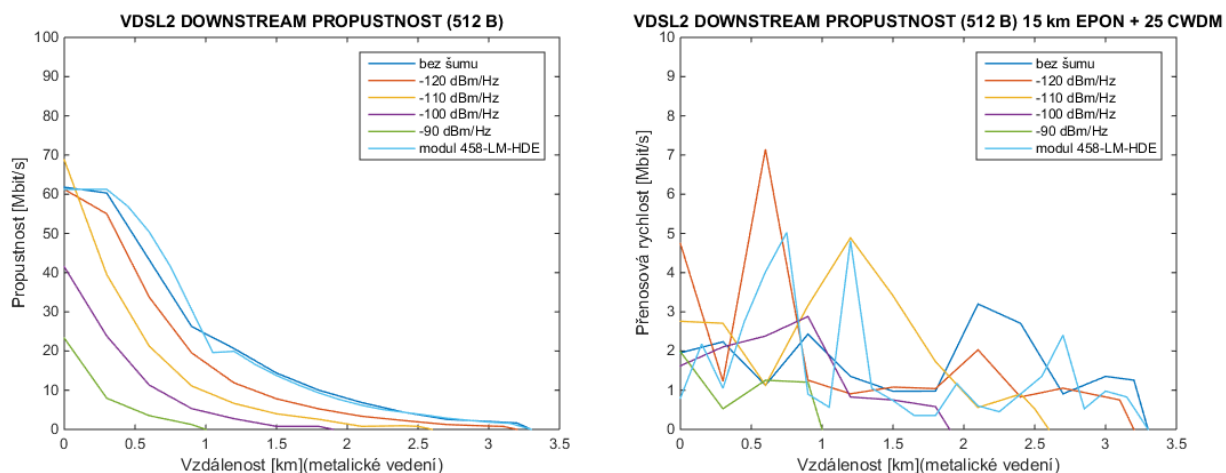
Výsledky propustnosti jsou prezentované na L2 vrstvě. Nejvyšší hodnoty propustnosti byly změřeny při velikosti rámců 64 B, kdy byla zaznamenána hodnota 77 Mbit/s s 0 km metalickou trasou + bez optické trasy v downstreamu. Naopak při velikosti rámců 512 B a 1518 B dosahovala propustnost nejvýše hodnoty kolem 60 Mbit/s. Jak je z grafů patrné, tak se vzrůstající metalickou trasou a přidáním šumem klesala propustnost sítě. Nejdelší spojení proběhlo při metalické trase 3,2 km pro simulátor Spirent DLS 6900 s vypnutým šumem. S přibývajícím šumem překlenutelná vzdálenost pochopitelně klesala. Při měření se simulátorem vedení Spirent 6900 DLS s vypnutým šumem bez optické trasy, lze pozorovat úbytek na polovinu maximální propustnosti při 0,8 km (64 B, 512 B, 1518 B) v downstreamu. Nejkratší překlenutelná vzdálenost metalického vedení byla zaznamenána se šumem -90 dBm/Hz a to 0,9 km. Velmi výrazným omezením propustnosti došlo pro připojení optické trasy do PON (15 km) a do WDM systému (25 km). Hodnoty propustnosti se velmi propadly a pohybovaly se nestabilně pod hranicí 1,4 Mbit/s (64 B), 7 Mbit/s (512 B), 8,5Mbit/s (1518 B) v downstreamu. U těchto výsledků již nebyla výrazná nepřímá úměra mezi propustností, metalickou trasou a šumem. Ve směru vzestupném (upstream) se největší hodnota propustnosti pohybovala kolem 44 Mbit/s (64 B), 35 Mbit/s (512 B, 1518 B) bez optické trasy. Po připojení optické trasy nedošlo u upstreamu k obrovskému propadu propustnosti, tak jak u downstreamu. Nicméně zde platilo, čím větší rámec, tím větší hodnota propustnosti (64 B - max 17 Mbit/s, 512 B - max 30 Mbit/s, 1518 B - max 35 Mbit/s). Z prezentovaných výsledků si lze i všimnout, že od určité trasy (metalické vedení) dochází k prudkému několikanásobnému poklesu propustnosti v upstreamu.



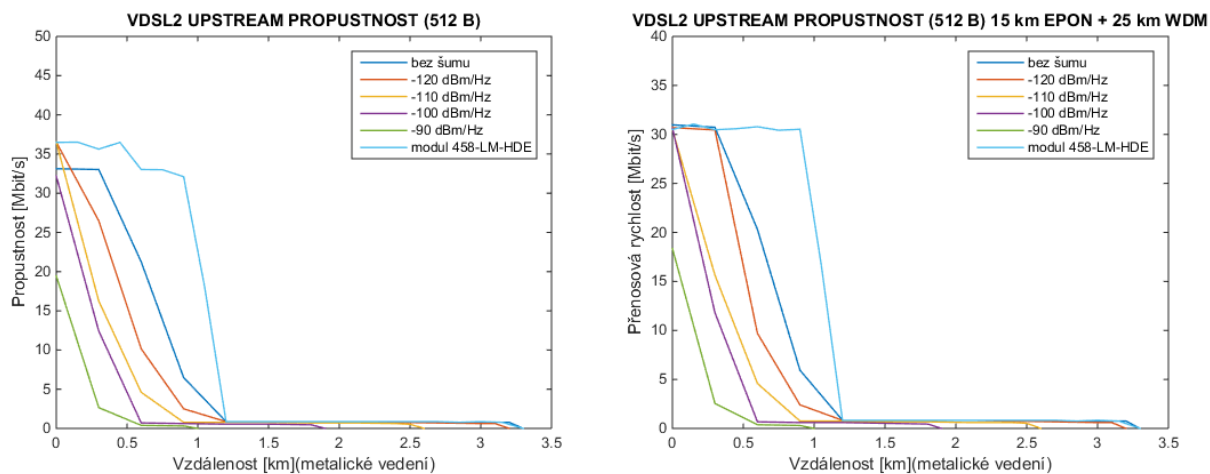
Obrázek 99: RFC 2544 VDSL2 - PROPUSTNOST (64 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



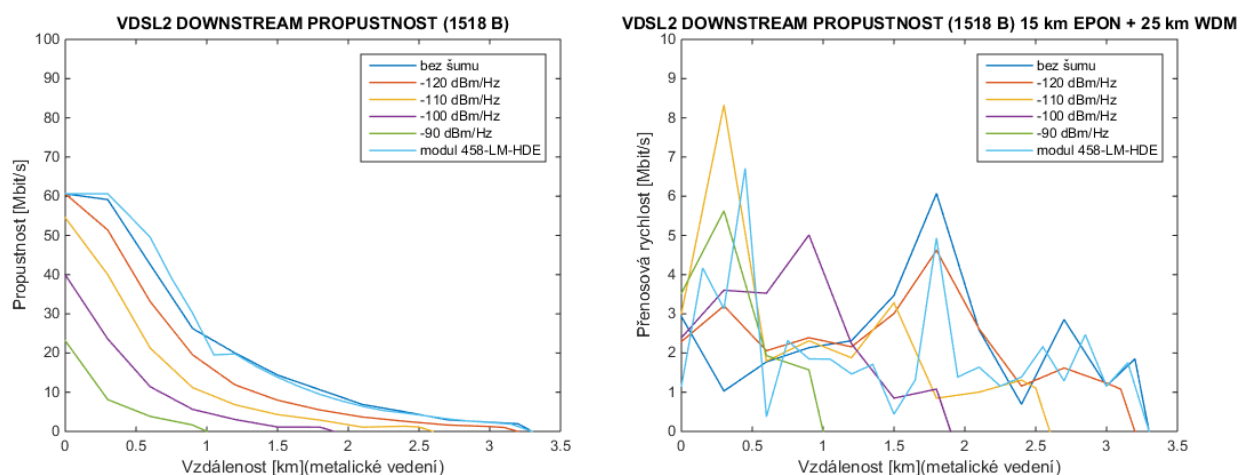
Obrázek 100: RFC 2544 VDSL2 - PROPUSTNOST (64 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



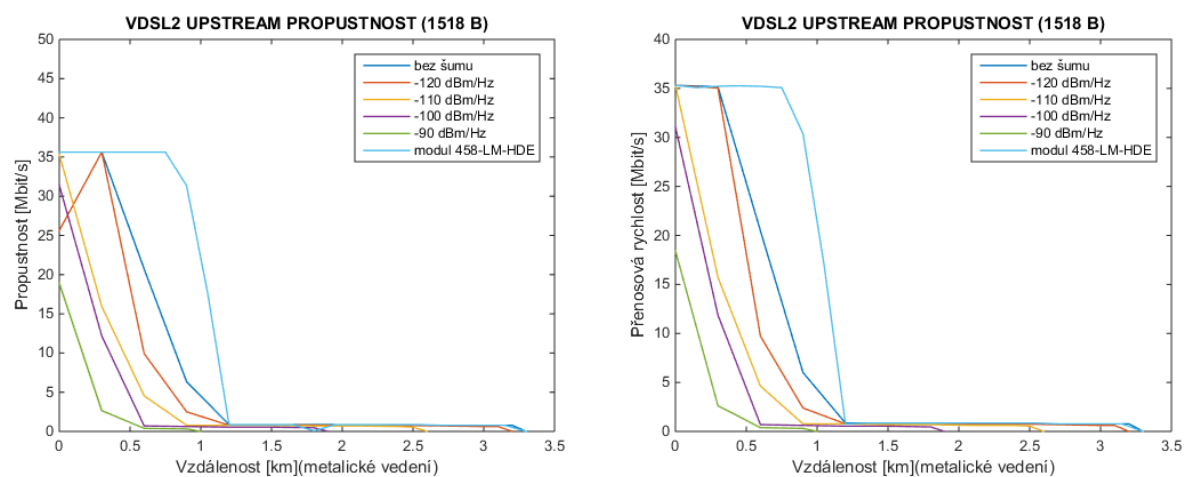
Obrázek 101: RFC 2544 VDSL2 - PROPUSTNOST (512 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 102: RFC 2544 VDSL2 - PROPUSTNOST (512 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



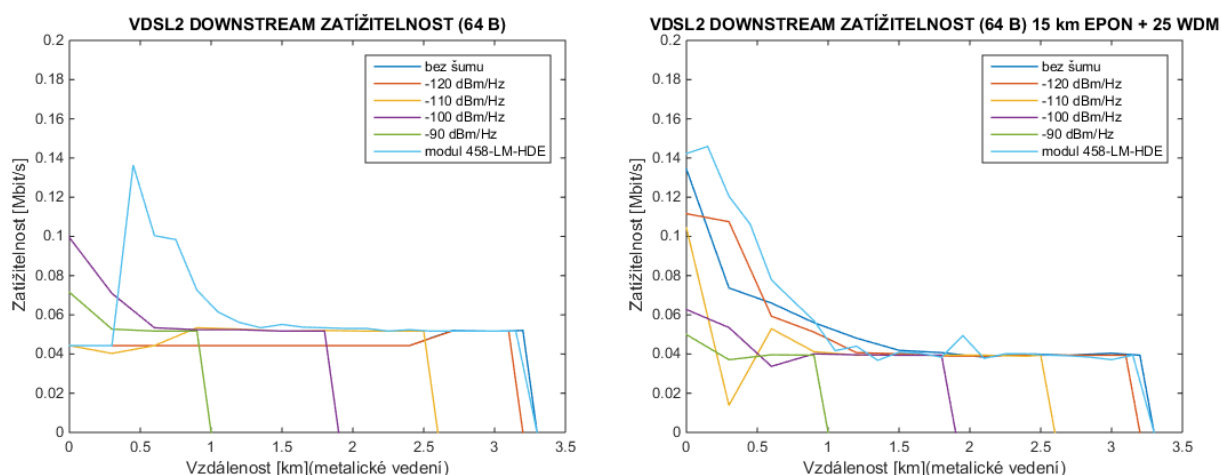
Obrázek 103: RFC 2544 VDSL2 - PROPUSTNOST (1518 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



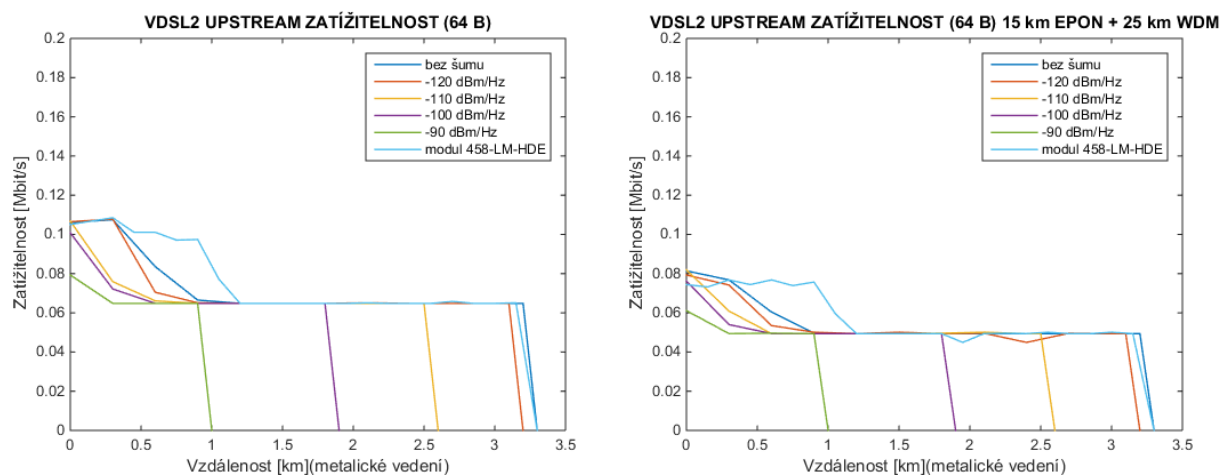
Obrázek 104: RFC 2544 VDSL2 - PROPUSTNOST (1518 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.1.2.2 RFC 2544 - ZATÍŽITELNOST- EPON/CWDM/VDSL2

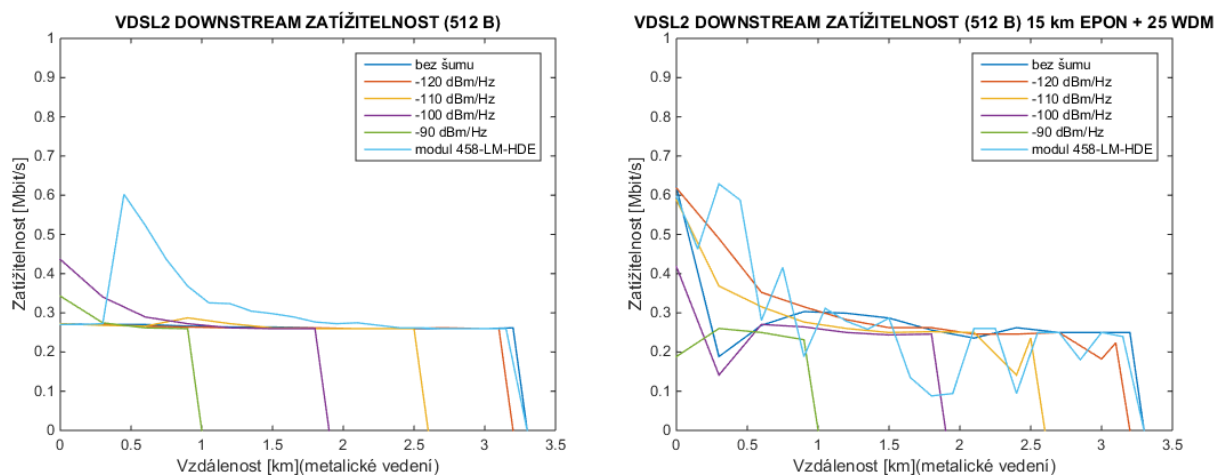
Zaznamenané hodnoty zatížitelnosti jsou velmi malé. Se vzrůstající velikostí rámců opět hodnoty rostly. Při 64 B se hodnota zatížitelnosti pohybovala pod hranicí 0,14 Mbit/s a při 512 B pod hranicí 0,6 Mbit/s. Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo při 1518 B a to 0.96 Mbit/s v downstreamu. Zatížitelnost v upstreamu byla oproti downstreamu menší (pod 0,14 Mbit/s) a velmi podobná ve srovnání se třemi velikosti rámců, akorát při rámcu 64 B byla zatížitelnost lehce nižší. Jak je vidět z grafů, tak s připojenou optickou trasou hodnoty zatížitelnosti se výrazně neměnily. V některých případech byla dokonce i naměřená vyšší hodnota. Co se týče šumu, tak hodnoty byly ovlivněny mírně šumem jen do vzdálenosti 1,5 km, poté se ustálily na společnou hodnotu. Šum po překlenutí vzdálenosti 1,5 km ovlivňoval jen celkovou dosažitelnou vzdálenost.



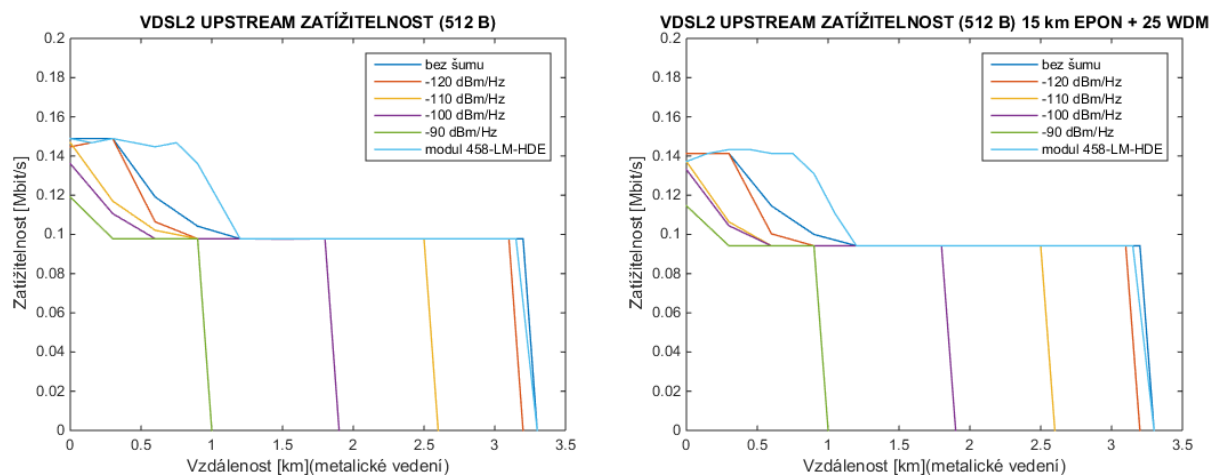
Obrázek 105: RFC 2544 VDSL2 - ZATÍŽITELNOST (64 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



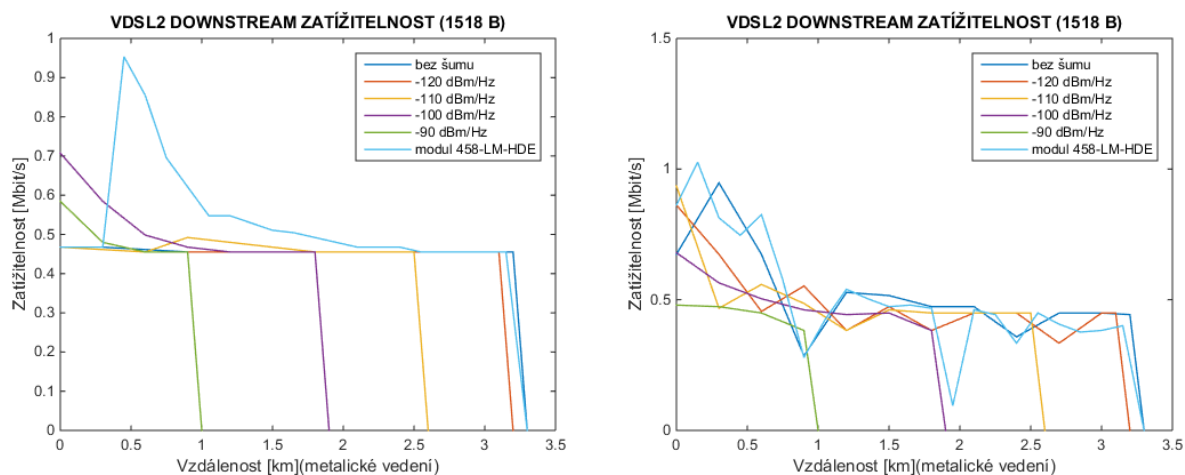
Obrázek 106: RFC 2544 VDSL2 - ZATÍŽITELNOST (64 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



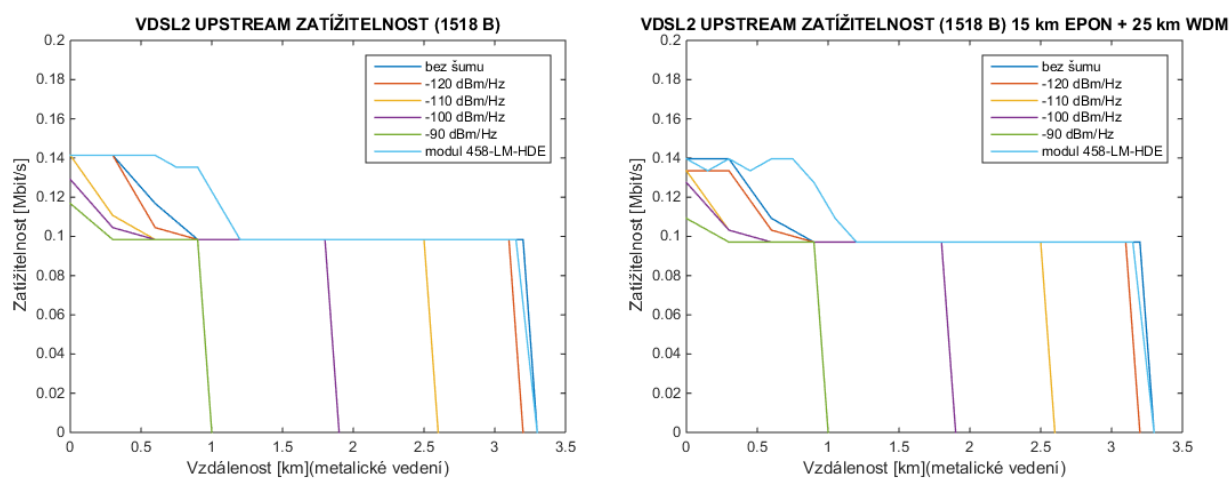
Obrázek 107: RFC 2544 VDSL2 - ZATÍŽITELNOST (512 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 108: RFC 2544 VDSL2 - ZATÍŽITELNOST (512 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



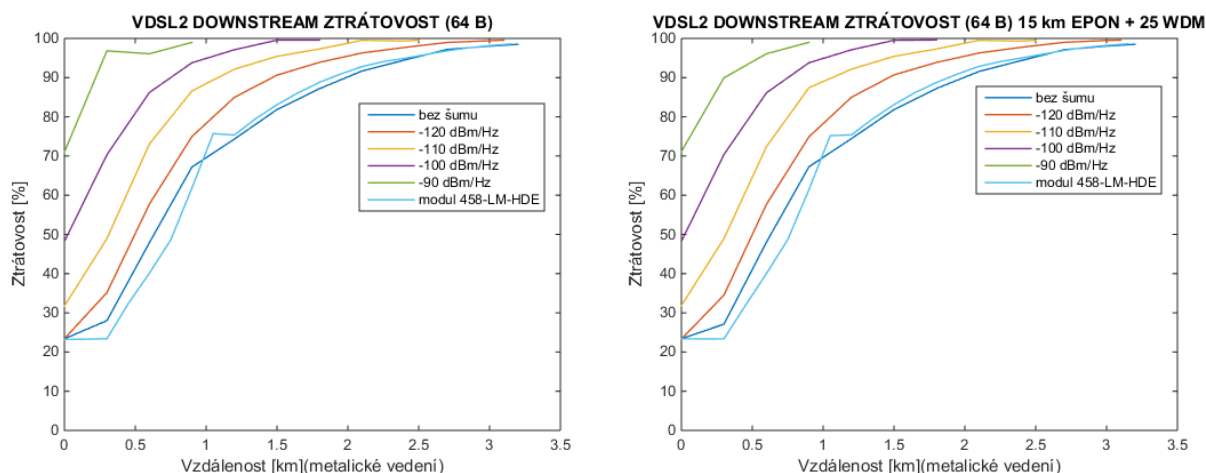
Obrázek 109: RFC 2544 VDSL2 - ZATÍŽITELNOST (1518 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



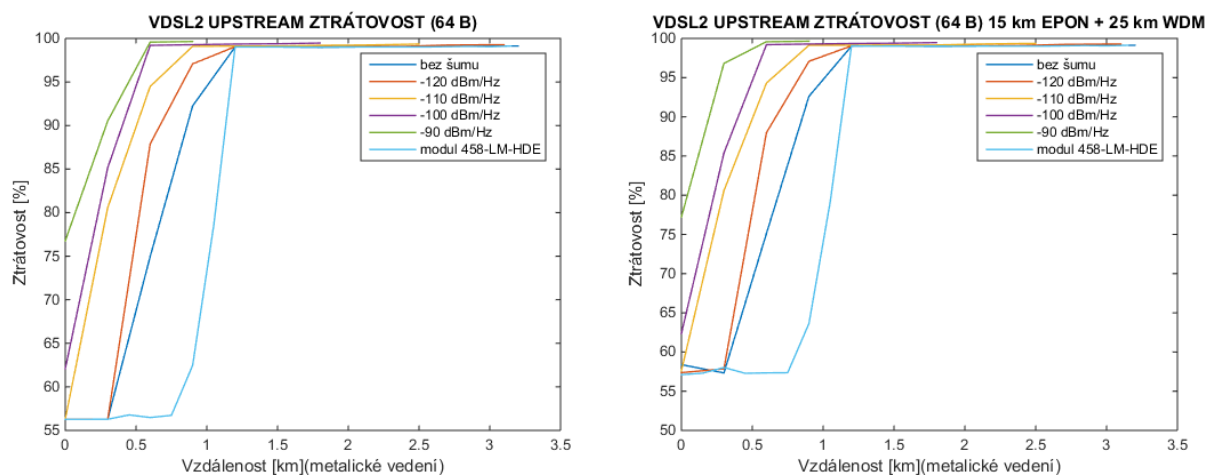
Obrázek 110: RFC 2544 VDSL2 - ZATÍŽITELNOST (1518 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.1.2.3 RFC 2544 - ZTRÁTOVOST- EPON/CWDM/VDSL2

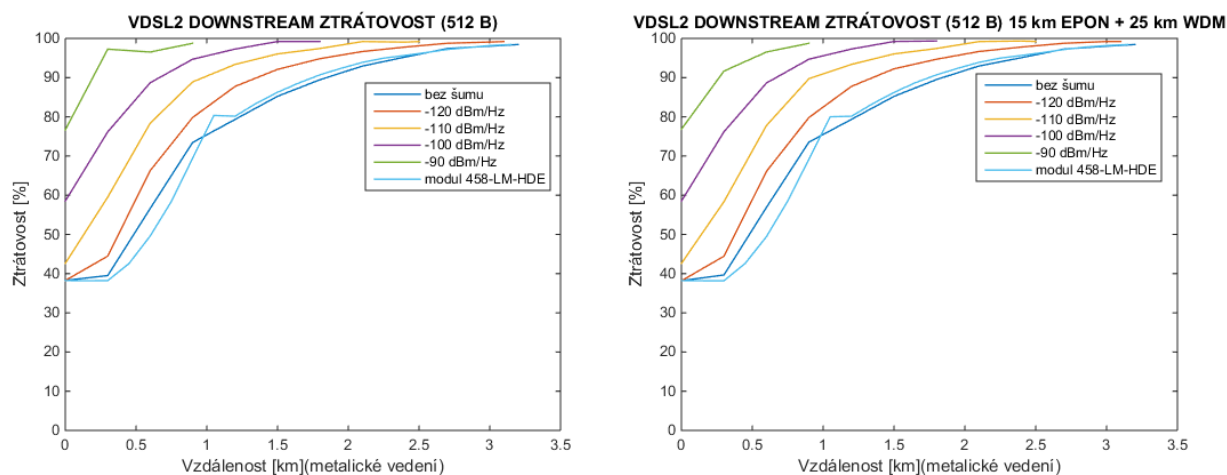
Hodnoty ztrátovosti jsou velmi vysoké, jelikož byly získány při vstupu proudu o 100 % rychlosti rozhraní média (100Mbit/s). Ztrátovost byla ovlivněna velikostí přidaného šumu do trasy a navíc samotnou trasou. Hodnoty také byly ovlivněny velikostí rámců. Nižší hodnoty rámců vykazovaly lepší výsledky. Při velikosti rámců 64 bit byly naměřeny hodnoty ztrátovosti nejmenší (při 0 km - 23 % u downstreamu a 57 % u upstreamu). Pro velikosti 512 B a 1518 B byly výsledky horší a velmi podobné (při 0 km - 40 % u downstreamu a 64 % u upstreamu). Nejnížší hodnoty ztrátovosti byly zaznamenány pro simulátor s modulem 458-LM-HDE a pro simulátor Spirent DLS 6900 s vypnutým přidaným šumem, ale i se šumem -120 dBm/Hz. Přidáním optické trasy nemělo téměř žádný vliv na hodnoty ztrátovosti v downstreamu a upstreamu.



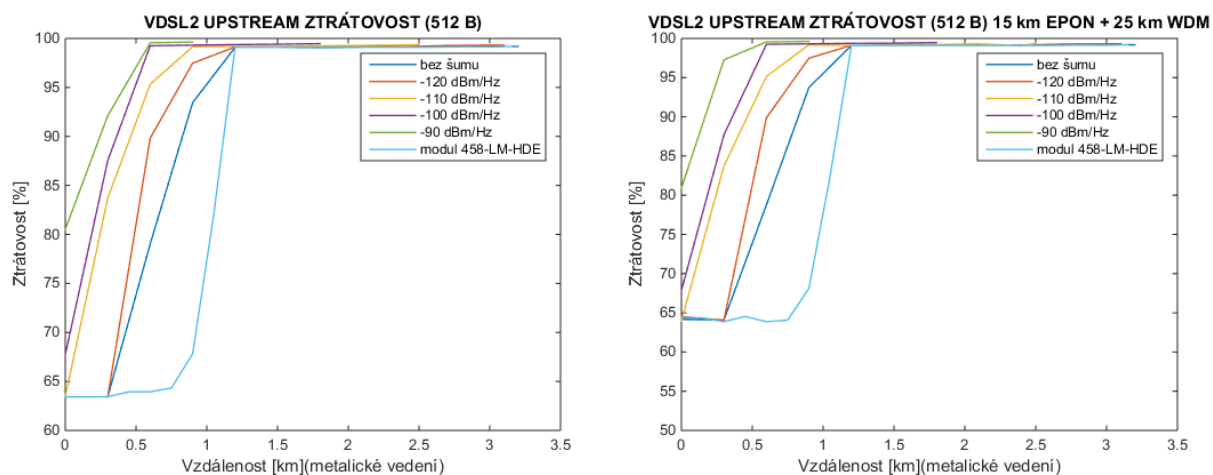
Obrázek 111: RFC 2544 VDSL2 - ZTRÁTOVOST (64 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



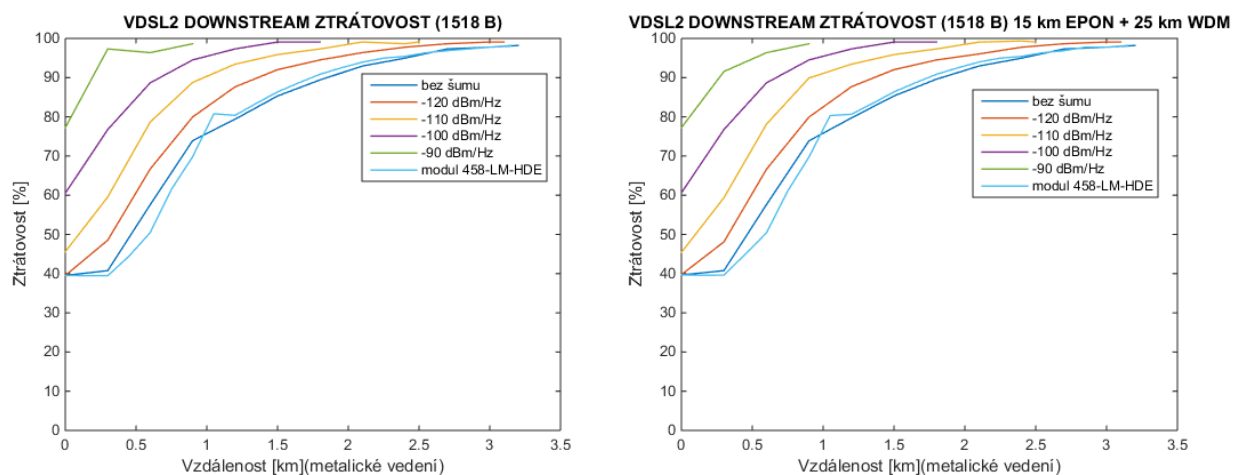
Obrázek 112: RFC 2544 VDSL2 - ZTRÁTOVOST (64 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



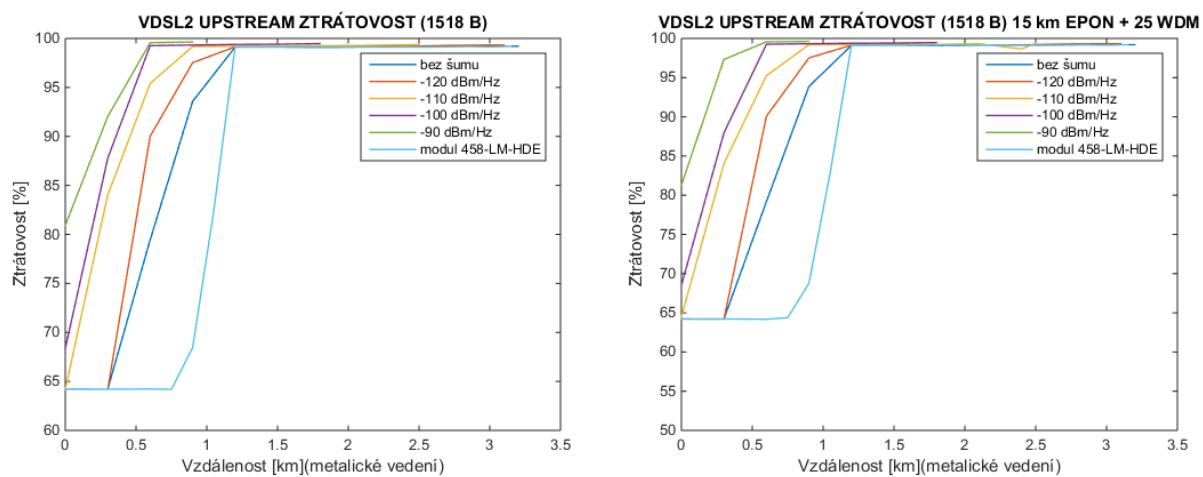
Obrázek 113: RFC 2544 VDSL2 - ZTRÁTOVOST (512 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 114: RFC 2544 VDSL2 - ZTRÁTOVOST (512 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



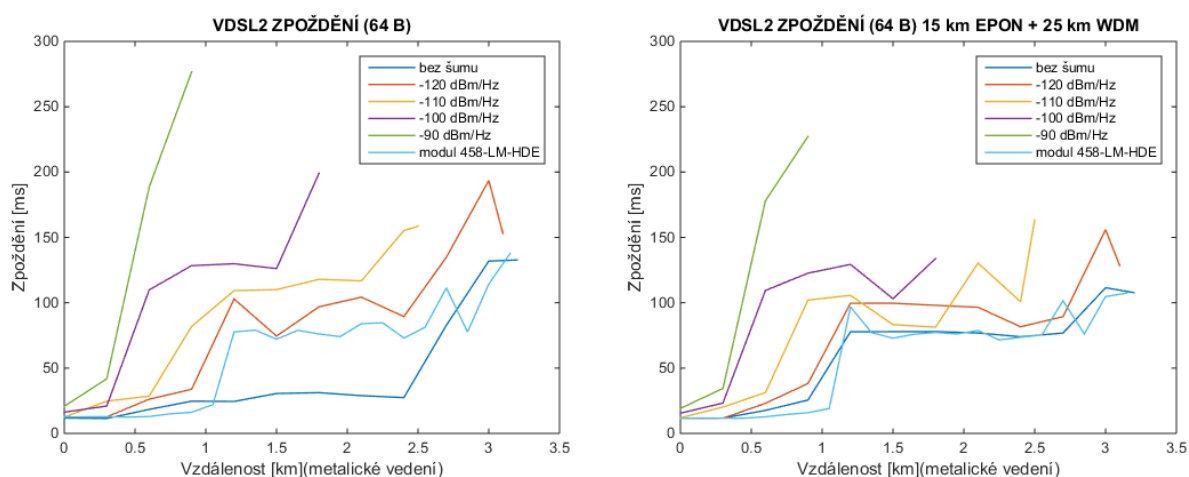
Obrázek 115: RFC 2544 ADSL2+ - ZTRÁTOVOST (1518 B) - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



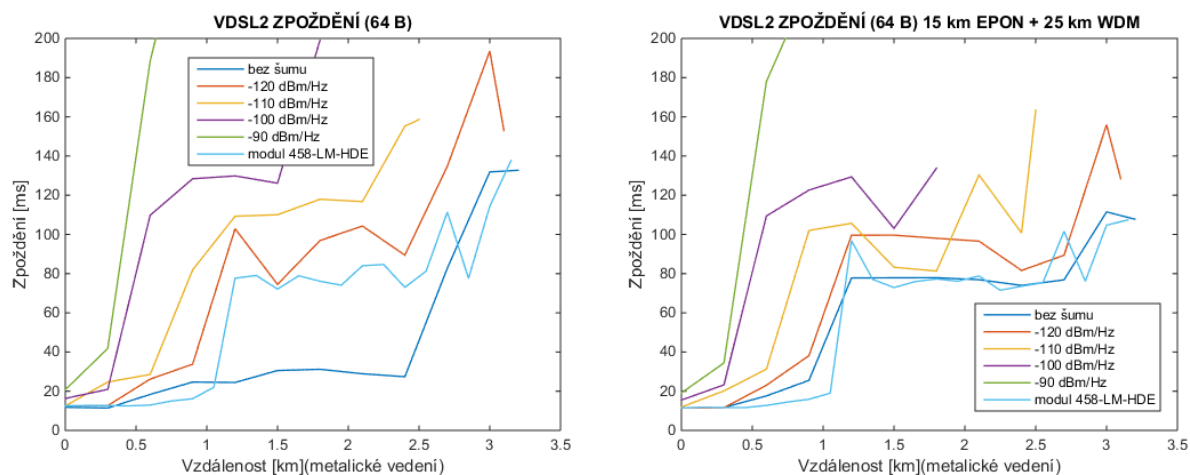
Obrázek 116: RFC 2544 VDSL2 - ZTRÁTOVOST (1518 B) - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.1.2.4 RFC 2544 - ZPOŽDĚNÍ- EPON/CWDM/VDSL2+

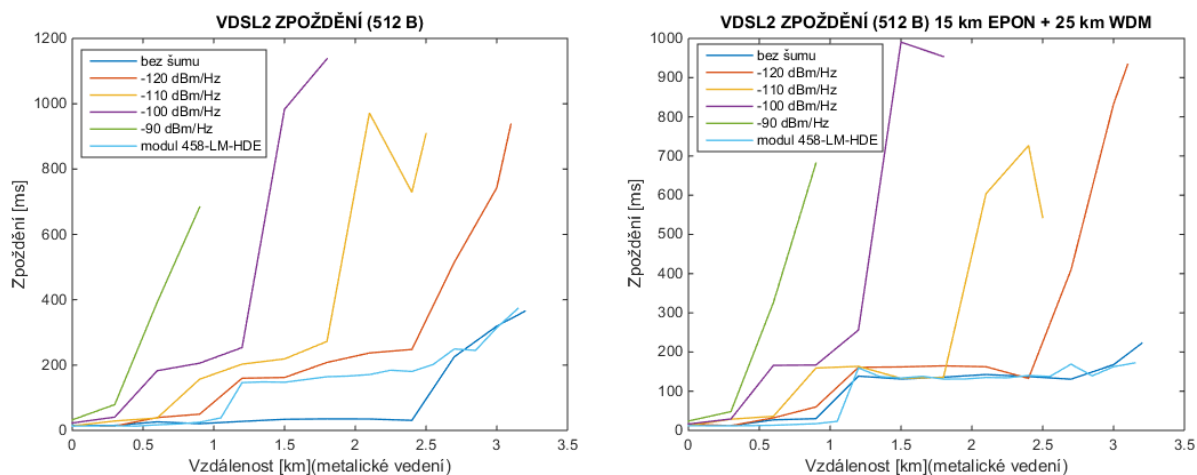
Změřené hodnoty zpoždění zde reprezentují obousměrné zpoždění (RTT - Round-Trip Time). Z naměřených výsledků je patrné, že hodnoty zpoždění závisely na délkách rámců, respektive s rostoucí velikostí paketů roste i velikost zpoždění. Například při 64 B bylo změřeno nejnižší zpoždění kolem 12 ms, při 512 B přibližně 15 ms a při 1518 B 26 ms bez optické trasy pro 0 km optické trasy. Hodnoty zpoždění se výrazně neměnily po připojení optické trasy, takže RTT zpoždění záviselo zejména na délce simulované metalické trasy a na hodnotě přidaného šumu. Někdy byly i hodnoty po připojení optické trasy nižší. Výjimku tvoří výsledky pro simulátor Spirent DLS 6900 s vypnutým šumem, kdy hodnoty po připojení optické trasy byly po 1 km metalické trasy větší (horší).



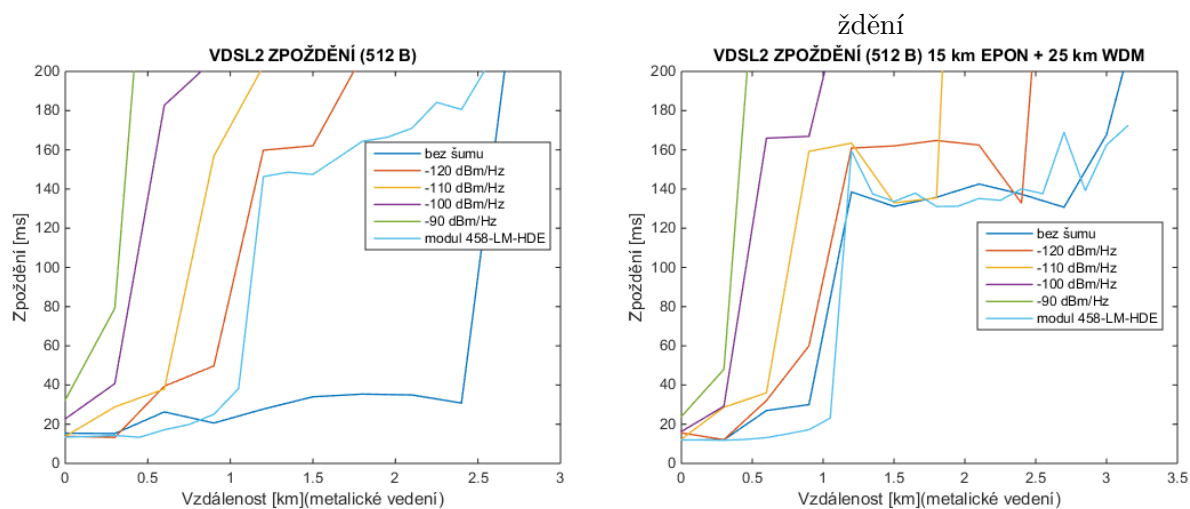
Obrázek 117: RFC 2544 ADSL2+ - ZPOŽDĚNÍ (64 B) - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



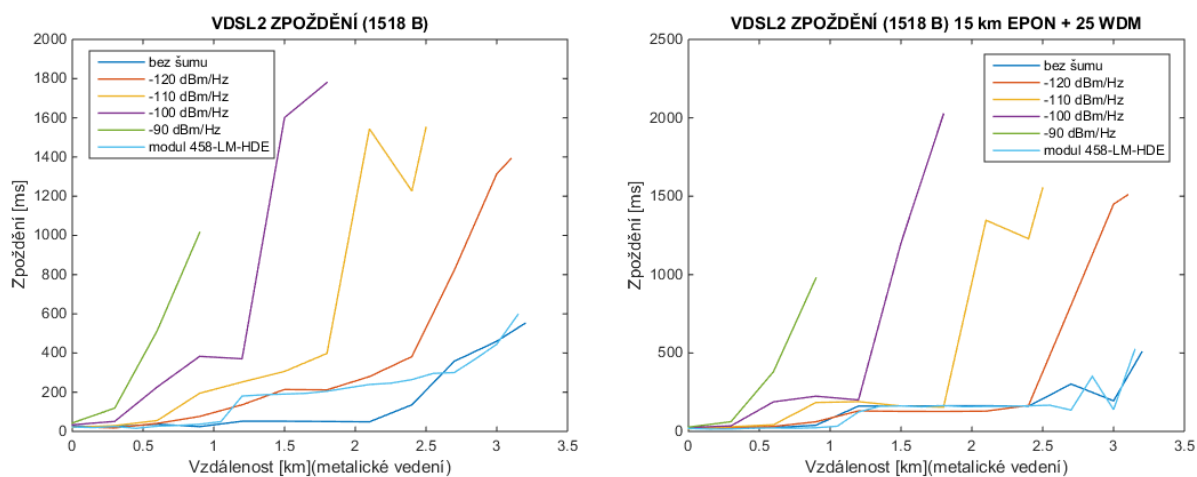
Obrázek 118: RFC 2544 ADSL2+ - ZPOŽDĚNÍ (64 B) - Výřez 200 ms - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



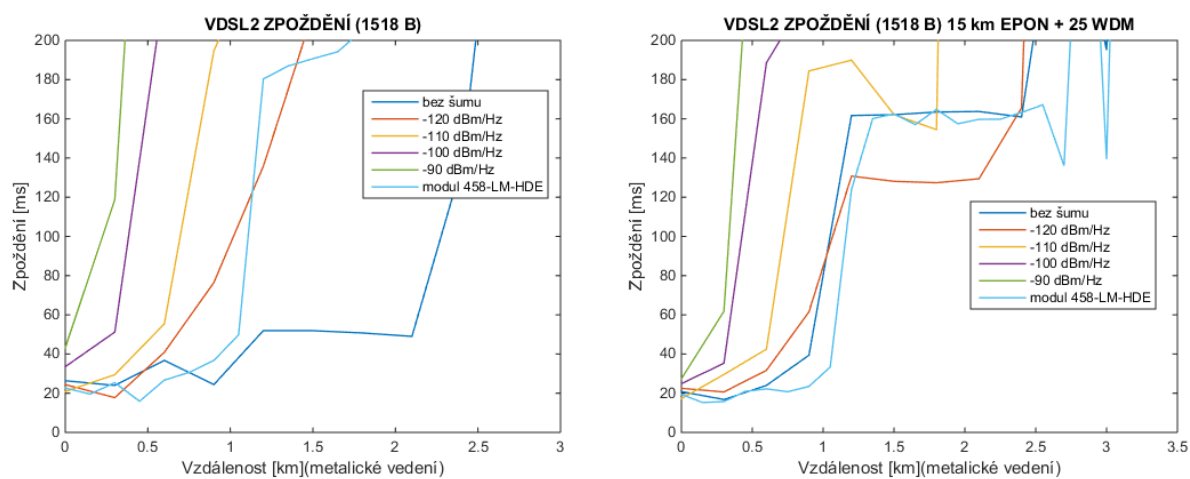
Obrázek 119: RFC 2544 VDSL2 - ZPOŽDĚNÍ (512 B) - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 120: RFC 2544 VDSL2 - ZPOŽDĚNÍ (512 B) - Výřez do 200 ms- bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 121: RFC 2544 VDSL2 - ZPOŽDĚNÍ (1518 B) - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 122: RFC 2544 VDSL2 - ZPOŽDĚNÍ (1518 B) - Výřez do 200 ms - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.2 ITU-T Y.1564 EtherSAM

Ethersam neboli označení ITU-T Y.1564 bylo přijato v roce 2011. Jedná se tedy o standardizovanou metodu pro testování služeb založených na Ethernetu a je vhodným nástrojem pro testování na živé síti s podporou ověření QoS (Quality of Service). Ethersam umožňuje simulovat všechny typy služeb, které se v síti budou provozovat a současně provést validaci SLA (service-level agreement) parametrů pro každou službu zvlášť, tedy ověření parametrů garantované poskytovatelem služeb. Ve srovnání s RFC 2544 je Ethersam daleko rychlejší i přesnější.

10.2.1 Rozdělení provozu

Provoz dle standardu je zákazníkovi rozdělen do 3. tříd a každá třída je znázorněna určitou barvou:

1. **Committed information rate (CIR)** - Určuje šířku pásma, která je garantována a vždy dostupná pro danou službu. Do hodnoty CIR jsou garantovány minimální výkonnostní parametry. Provoz je značen zelenou barvou.
2. **Excess information rate (EIR)** - Jedná se o nadbytečnou šířku pásma, která závisí na vytíženosti sítě. Negarantuje minimální výkonnostní parametry. Pro zobrazení provozu se využívá žlutá barva.
3. **Discarded traffic** - Zahozený provoz. Představuje tzv. červený provoz, který je nad pásmy CIR nebo CIR/EIR. Kdyby se neprovedlo jeho zahození, došlo by k rušení ostatních služeb.[18]

10.2.2 Klíčové indikátory výkonnosti

Jedná se o parametry vyjadřující minimální výkonové požadavky. KPI (Key Performance Indicators) parametry jsou během testu měřeny a porovnávány se zadanými požadavky. Pokud nesplňují zadané požadavky, test je vyhodnocen jako neúspěšný. Mezi typické patří:

1. **Šířka pásma (Bandwidth)** - Jedná se o šířku pásma, která musí být vždy k dispozici pro danou službu.[18]
2. **Ztrátovost paketů (Frame loss)** - Ztrátovost paketů může vzniknout z mnoha důvodů, například kvůli přetížení sítě nebo přenosové chyby. Chyba může být způsobena fyzikálním jevem, což vede k tomu, že pakety jsou zahozeny na síťovém zařízení (switch, router) na základě porovnávání sekvenčních polí. Z důvodu možnosti přetížení sítě dochází také k zahazování paketů na síťovém zařízení.[18]
3. **Rámcové zpoždění (Frame Delay)** - Jedná se o zpoždění vzniklé přenosem rámce, tudíž je měřen čas mezi odesláním a přijetím rámce. Tento parametr je rozhodující pro hlasové aplikace. Příliš velké hodnoty zpoždění mohou ovlivnit kvalitu hovoru.[18]

4. **Rozptyl zpoždění (Jitter)** - Jedná se o kolísání rámcového zpoždění. Poukazuje na proměnlivost časů mezi příchody rámců. Během přenosu sítí jsou rámce (pakety) na směrovačích řazeny do front a jsou v burstech posílány dále. Může dojít k náhodnému určení priorit, které způsobí, že paket se bude šířit rozdílnou rychlostí, a díky tomu jsou pakety přijímány v rozdílných intervalech. Jitter je velmi důležitý parametr pro real-time přenos videa a hlasu. Vyrovnávací paměť koncového zařízení slouží pro ukládání určitého množství videa nebo hlasových paketů, které jsou poté zpracovávány v pravidelných intervalech tak, aby poskytovaly koncovému uživateli hladký a bezchybný přenos. Příliš velká hodnota jitter ovlivní QoE (Quality of Experience), protože když paket dorazí rychleji, tak ve vyrovnávací paměti není dostatek místa, takže dojde k zahození paketu. V opačném případě, když paket dorazí pomaleji, dojde k vyprázdnění paměti a obraz poté může působit staticky. [18]

10.2.3 Konfigurační test služeb

Konfigurační test služeb slouží pro ověření šířky pásma a výkonnostních parametrů definovaných uživatelem pro danou službu. Tento proces se skládá ze 3 fází a měří všechny výkonnostní parametry během těchto kroků. Aby byl test úspěšný, musí být úspěšné všechny 3 fáze.

- **Minimální přenosová rychlost až po CIR (1.fáze)** - Během této fáze je u vybrané služby zvyšována šířka pásma z minimální přenosové rychlosti až k CIR. Tím se ujistíme, že síť je schopná podporovat danou službu v rozdílných přenosových rychlostech při zachování úrovně výkonu. V každém kroku při zvyšování přenosové rychlosti k CIR jsou měřeny automaticky systémem KPI parametry pro ujištění, že jsou minimální výkonnostní cíle splněny. Pokud selže některý výkonnostní cíl, tak selže i fáze. Zda-li test projde nebo neprojde, záleží na kritériích (viz. tabulka 37).[18]

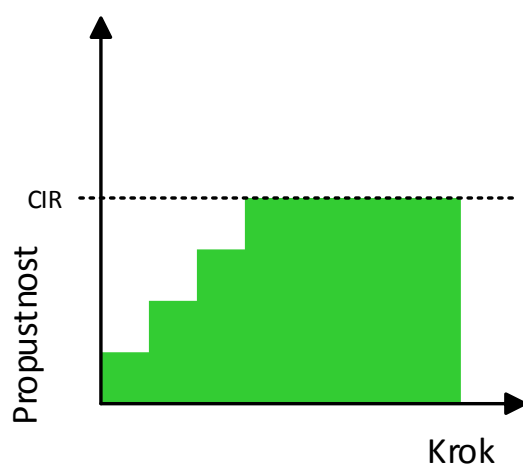
Prošel	KPI jsou splněny v rámci SLA
Neprošel	Jakýkoliv KPI není splněn

Tabulka 37: Kritéria pro vyhodnocení 1. fáze.[18]

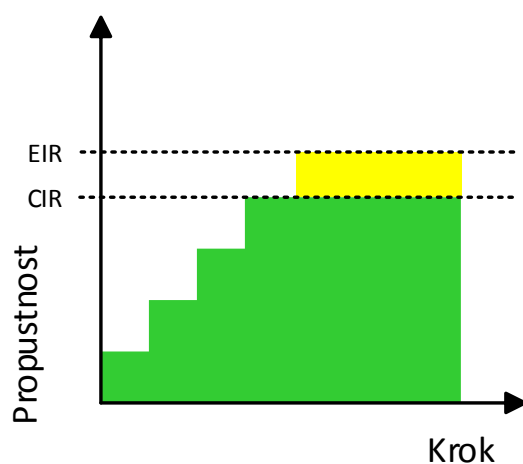
- **Od CIR k EIR (2. fáze)** - V této fázi je přenosová rychlost zvyšována od CIR až k EIR. Tím zjistíme, jestli je služba EIR správně nakonfigurovaná a jaké rychlosti je možno dosáhnout. Jelikož pod EIR hodnotou není garantována výkonnost, tak posuzování KPI parametrů neprobíhá. Během této fáze se jen sleduje přijímaná propustnost. Kritéria pro úspěšné vyhodnocení fáze se nachází v tabulce 38.[18]

Prošlo	Přijatý provoz (Mb/s) je větší nebo rovný CIR a zároveň menší nebo rovný EIR
Neprošlo	Přijatý provoz (Mb/s) je menší než CIR

Tabulka 38: Kritéria pro vyhodnocení 2. fáze.[18]



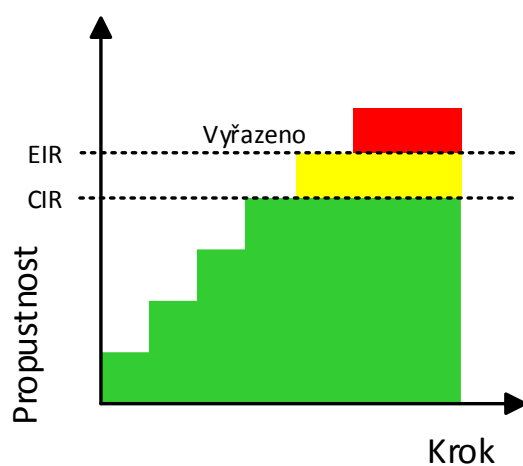
Obrázek 123: Test do CIR.[18]



Obrázek 124: Test od CIR do EIR.[18]

- **Překročení EIR (3. fáze)** - Důležitým atributem při přenosu paketů je schopnost zvládat rušivý provoz, proto při překročení podmínek pro dostupnou šířku pásma nad hodnotu EIR by mělo docházet k zahození provozu. V tomto kroku je odeslán provoz rychlostí až nad hodnotu EIR a poté je sledován přijímaný provoz. Nejméně do CIR by měl provoz bezproblémově procházet. Provoz do EIR by měl procházet v závislosti na dostupnosti zdrojových prostředků, a provoz nad hodnotu EIR by měl být vyřazen. Pokud obdržený provoz překračuje EIR, znamená to, že zařízení není správně nakonfigurováno. Kritéria pro vyhodnocení jsou uvedeny v tabulce 39. [18]

Všechny tyto 3 fáze jsou prováděny pro každou službu. Pokud v síti existuje více služeb, měla by být každá služba testována postupně. Na konci konfiguračního testu má uživatel jasnou



Obrázek 125: Test při překročení EIR.[18]

Prošlo	Přijatý provoz (Mb/s) je větší nebo rovný CIR a zároveň menší nebo rovný EIR
Neprošlo	Přijatý provoz (Mb/s) je menší než CIR nebo větší než EIR

Tabulka 39: Kritéria pro vyhodnocení 3. fáze.[18]

představu o tom, jestli jsou síťové prvky a cesta správně nakonfigurovány tak, aby poskytovaly služby při splnění minimálních KPI.

10.2.4 Výkonnostní test služeb

Výkonnostní test služeb se zaměřuje na dodržování QoS parametrů při simulovaném provozu všech služeb najednou. V tomto testu jsou všechny služby generovány zároveň s rychlostmi, které jsou nastaveny na požadovanou hodnotu CIR. Během testu, který může trvat několik minut až dnů, je zvlášť sledován výkon jednotlivých služeb. Jestliže jakákoliv služba nesplňuje výkonové požadavky, tak je test neúspěšný. [18]

Tabulka 40: Kritéria pro vyhodnocení výkonostního testu služeb.

Prošlo	KPI parametry všech služeb splňují minimální požadavky
Neprošlo	Jakýkoliv KPI parametr nesplňuje minimální požadavky

Nastavení testu EtherSAM (ITU-T Y.1564) pro hybridní síť s VDSL2 je zobrazeno v tabulce 42. Pro první službu IPTV byl zvolen kodek HDTV MPEG-4 a pro službu VoIP kodek G.711. Poslední služba DATA byla nastavena na hodnotu CIR 20 Mbit/s v downstreamu a 2 Mbit/s v upstreamu, jak je často v tomto poměru nabízena poskytovateli internetu. U hybridní sítě s ADSL2+ bylo nastavení poněkud odlišné. Zejména služba IPTV, zde nebyla testována, jelikož potřebovala propustnost 10,5927 Mbit/s ve směru upstream, což ADSL2+ v tomto případě nedosahovalo. Změna nastavení proběhla i u služby DATA, kde hodnota CIR v downstreamu byla nastavena na 8 Mbit/s a 0,512 v upstreamu. VoIP služba byla opět nastavena s kodekem G. 711. Nastavení si lze prohlédnout v tabulce č. 41 Níže jsou zobrazeny výsledky KPI parametrů, které byly získány při výkonostním testu služeb, kdy byly testovány všechny 3 služby současně.

Tabulka 41: Nastavení jednotlivých služeb pro testování hybridní sítě s ADSL2+.

Služba	Typ a počet	Profil služby	CIR - DS [Mbit/s]	CIR - US [Mbit/s]	Velikost rámců [B]
1	VoIP x 1	G.711	0.1316	0.1316	Pevná
2	DATA x 1	Data	8	0,512	Náhodná

Tabulka 42: Nastavení jednotlivých služeb pro testování hybridní sítě s VDSL2.

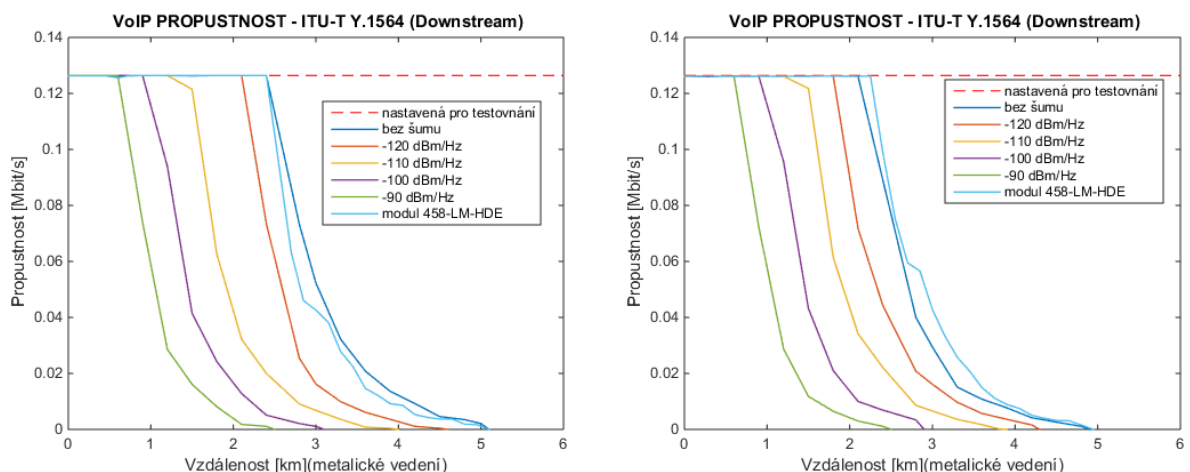
Služba	Typ a počet	Profil služby	CIR - DS [Mbit/s]	CIR - US [Mbit/s]	Velikost rámců [B]
1	IPTV x 1	HDTV MPEG4	10.5927	10.5927	1374 (Pevná)
2	VoIP x 1	G.711	0.1316	0.1316	Pevná
3	DATA x 1	Data	20	2	Náhodná

10.2.5 ITU-T Y.1564 pro hybridní síť EPON/CWDM/ADSL2+

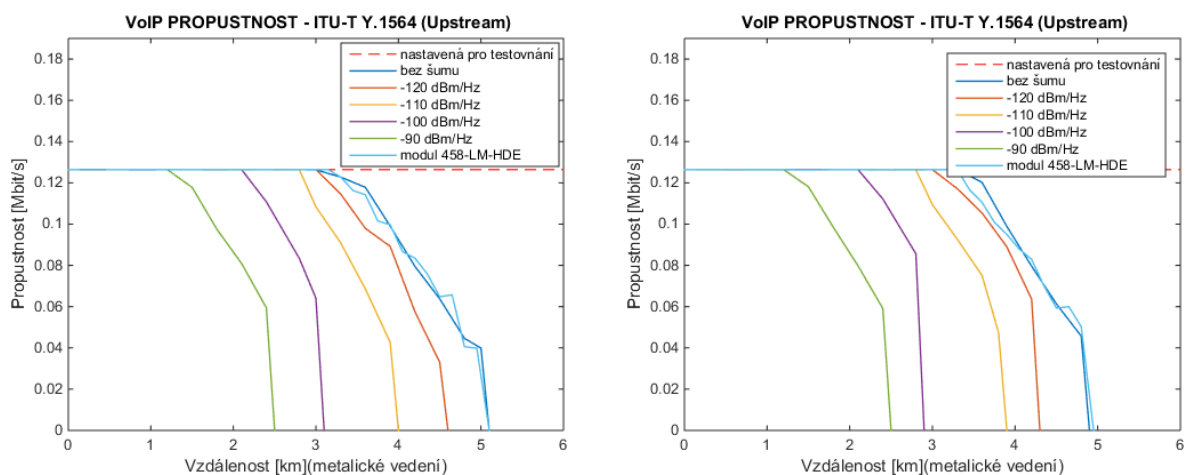
Na obrázcích níže jsou zobrazeny v grafech naměřené hodnoty propustnosti, ztrátovosti, zpoždění a kolísání zpoždění (jitter). Tyto KPI parametry byly získány při výkonostním testu služeb, kdy se testovaly všechny 3 služby současně. Měření proběhlo na portu č. 10 s přenosovou rychlostí 26 Mbit/s v sestupném směru a 1,2 Mbit/s ve vzestupném směru. Pro metalickou trasu byl využit simulátor vedení Telebyte 458-3SL(modul 458-LM-HDE) a Spirent DLS6900 s nastavitelným vložitelným šumem. Pro testování RFC6349 byly použity hodnoty šumu v rozmezí -120 dBm/Hz až -90 dBm/Hz.

10.2.5.1 ITU-T Y.1564 - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - EPON/CWDM/ADSL2+

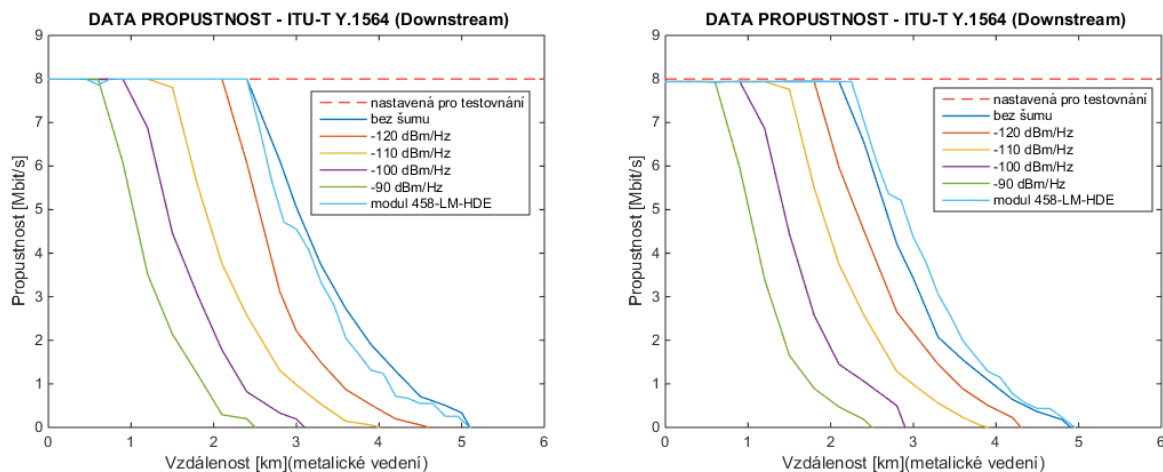
Pro správnou funkci VoIP služby je zapotřebí propustnost 0,1264 Mbit/s při kodeku G. 711. Takovou hodnotu bylo možné naměřit ve směru downstream až do vzdálenosti metalického vedení 2,4 km (bez šumu, modul 458-LM-HDE) bez připojené optické trasy. S připojenou optickou trasou došlo k mírnému snížení maximální vzdálenosti, při které bylo možno naměřit hodnotu kolem 0,1264 Mbit/s. V případech "bez šumu" a "modul 458-LM-HDE" se tato vzdálenost snížila na 2,1 km a 2,25 km. Ve směru upstream požadovaná propustnost setrvala až do vzdálenosti 3,3 km (bez šumu, modul 458-LM-HDE), tedy o 1 kilometr dále než v opačném směru. S připojenou optickou trasou nedošlo k téměř žádnému poklesu v upstreamu. Při nastavení šumu -90 dBm/Hz byla požadovaná propustnost dostupná až do vzdálenosti 0,6 km v downstreamu. V opačném směru až do 2x větší vzdálenosti (1,2 km). Takřka stejný průběh propustnosti byl zaznamenán i u služby DATA. Tato služba byla nastavena na hodnotu 8 Mbit/s v downstreamu a 0,512 v upstreamu. Požadovaná propustnost byla dostupná stejně jako VoIP propustnost.



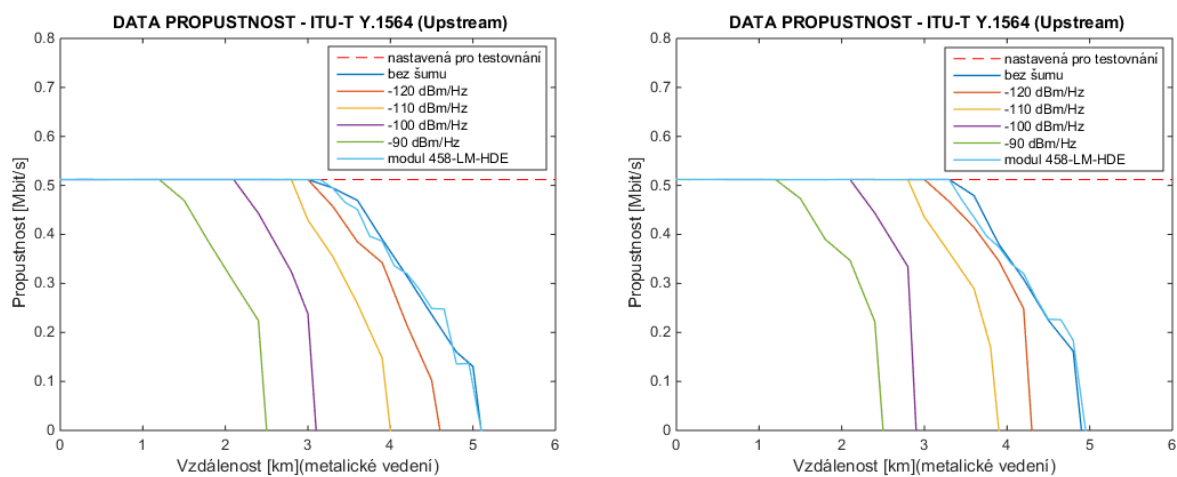
Obrázek 126: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - VoIP - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 127: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - VoIP - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



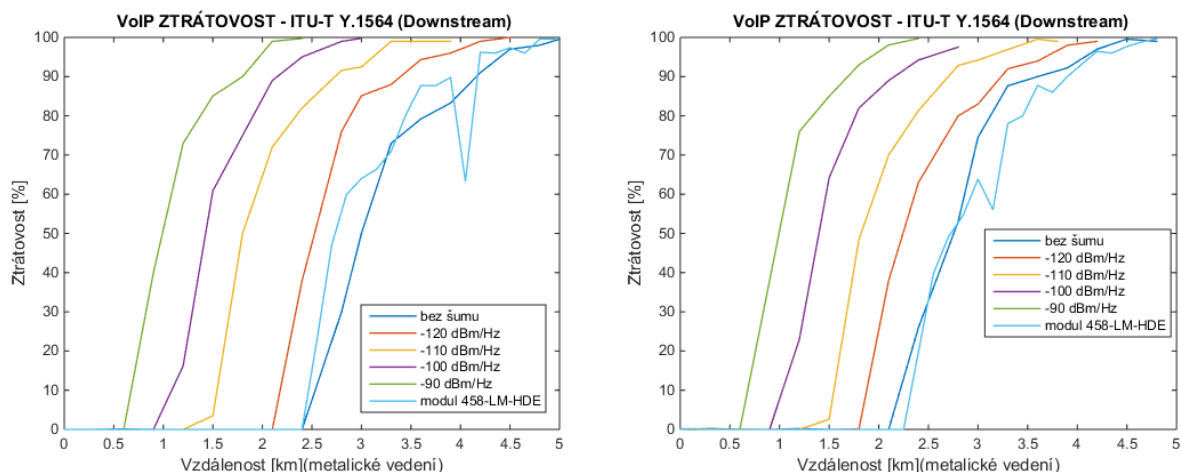
Obrázek 128: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - DATA - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



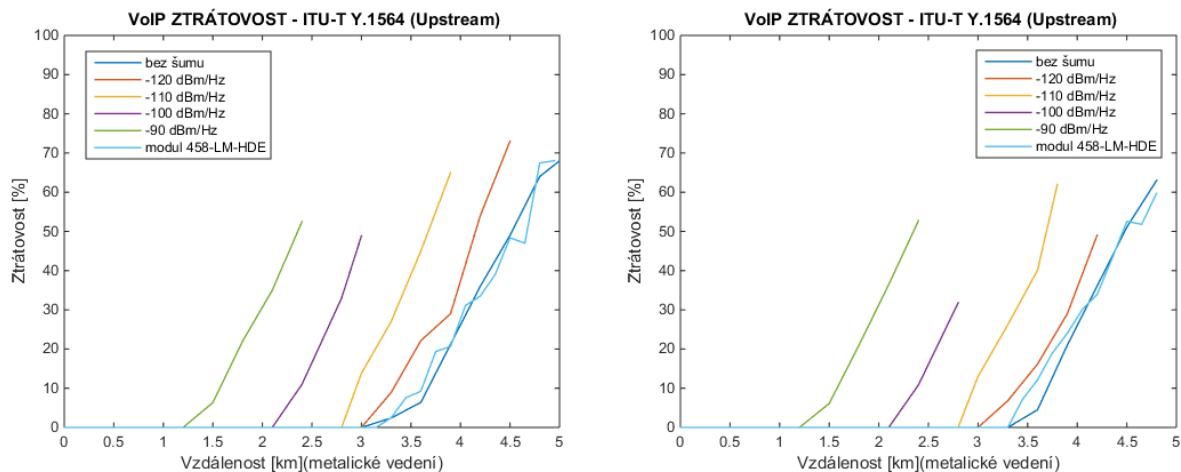
Obrázek 129: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - DATA - UPSTREAM
- bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.2.5.2 ITU-T Y.1564 - ZTRÁTOVOST- EPON/CWDM/ADSL2+

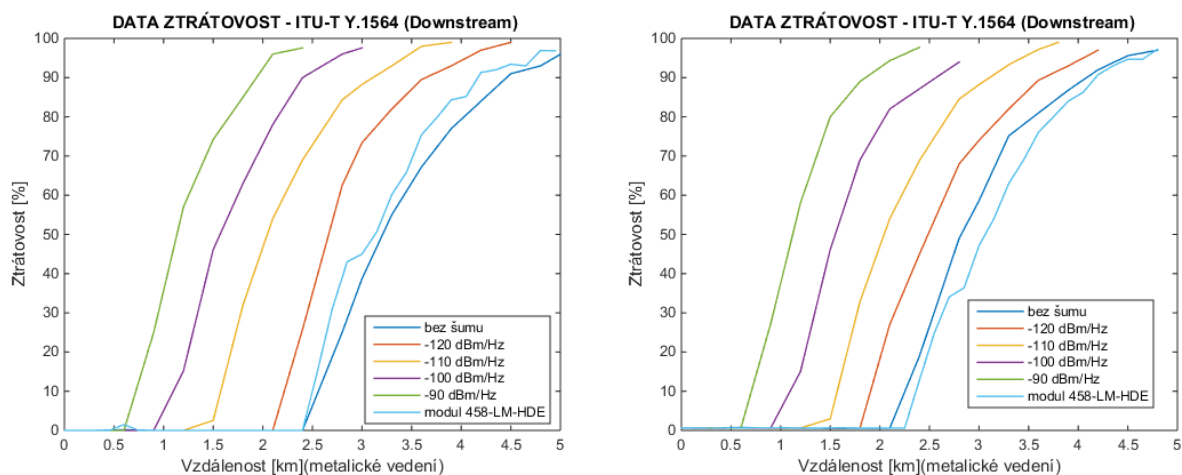
Ztrátovost byla hlavně ovlivněna velikostí přidaného šumu do trasy. K bezdrátovému přenosu docházelo u VoIP a DAT až do vzdálenosti 2,4 km (bez šumu, modul 458-LM-HDE) v downstreamu. Po překonání této vzdálenosti měla ztrátovost tendenci extrémně narůstat. U upstreamu bylo možné dosáhnout 0% ztrátovosti až do vzdálenosti 3,3 km. Připojená optická trasa měla jen slabý negativní vliv na hodnoty v downstreamu, kdy se maximální vzdálenost posunula o 300 m nebo 150 m. Optická trasa u upstream neměla téměř žádný vliv.



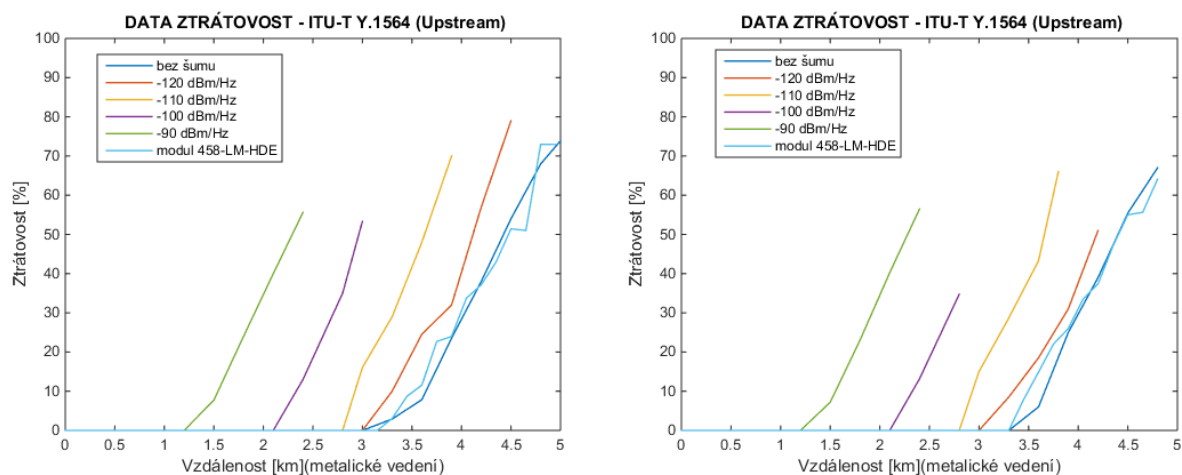
Obrázek 130: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - VoIP - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 131: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - VoIP - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



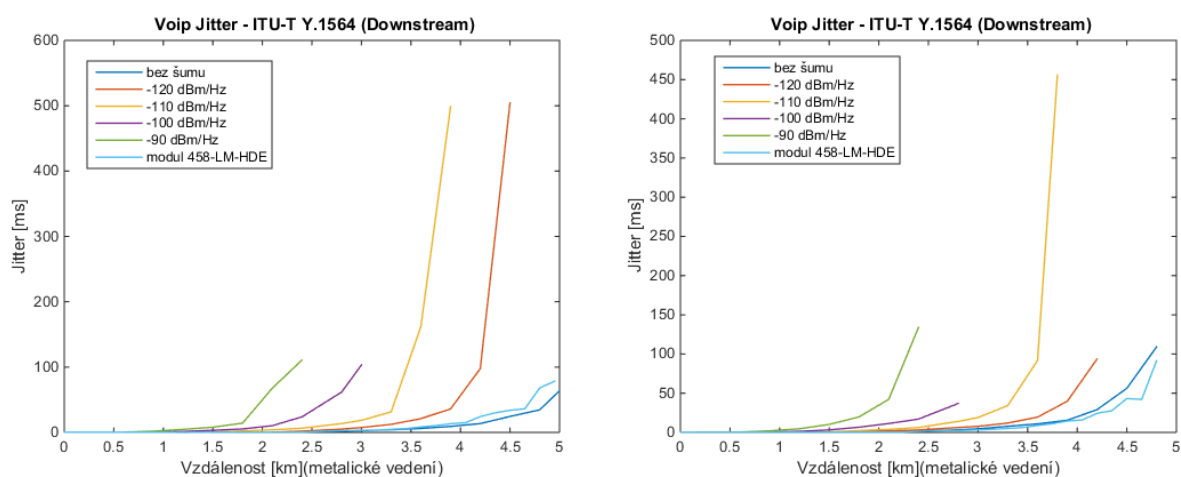
Obrázek 132: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - DATA - DOWN-STREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



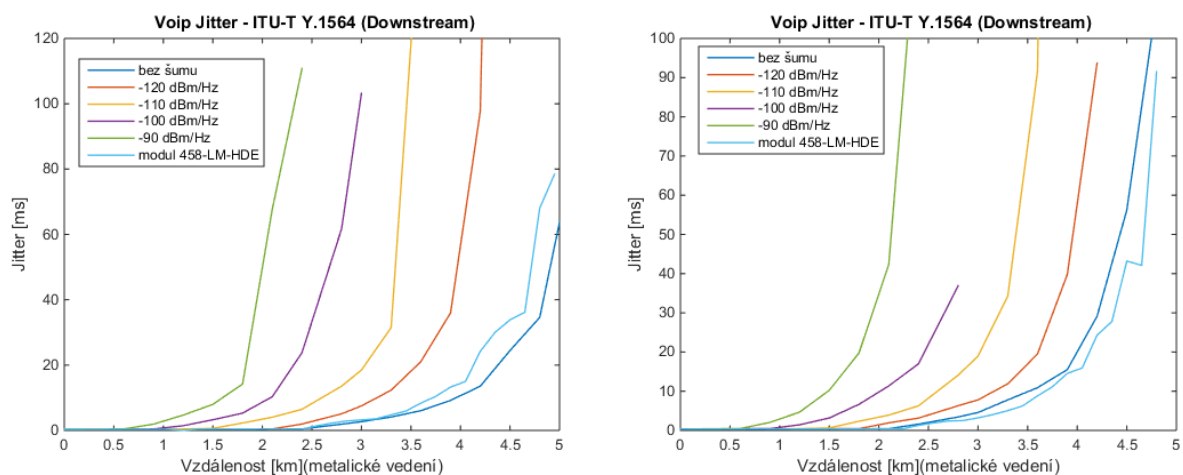
Obrázek 133: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - DATA - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.2.5.3 ITU-T Y.1564 - PRŮMĚRNÉ JITTER - EPON/CWDM/ADSL2+

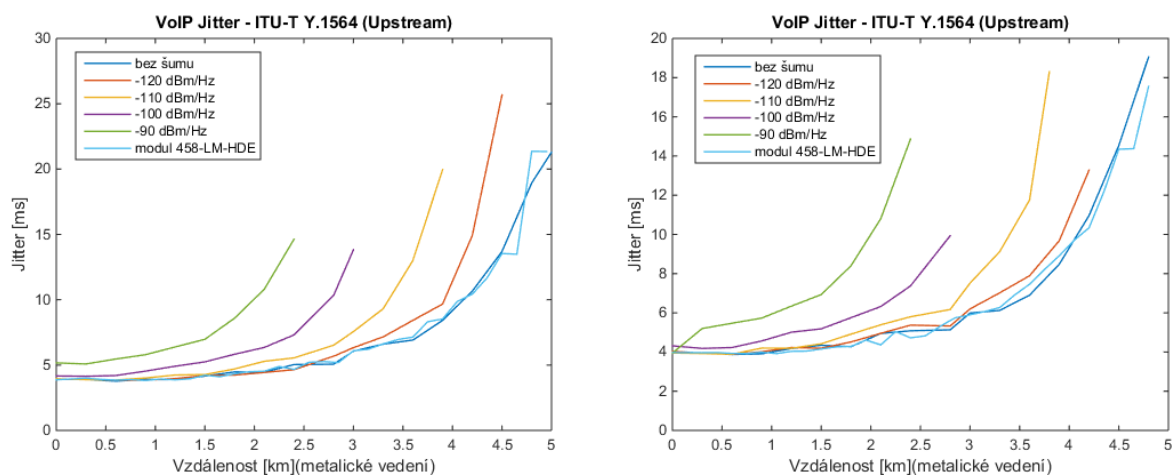
Při porovnávání upstreamu a downstreamu je viditelné, že hodnoty kolísání zpoždění (jitter) jsou menší v downstreamu, ale jen zpočátku. Při překročení určité metalické trasy dochází k velkému nárůstu kolísání zpoždění ve směru downstream. Z toho vyplývá, že parametr jitter roste ve směru upstream pomaleji. Dále jitter VoIP v downstreamu disponuje ze začátku podobnými hodnotami jako u datové služby, ale s rostoucí vzdáleností metalické trasy roste i parametr jitter u VoIP. Například u varianty "bez šumu" se tato rozdílnost projevuje od vzdálenosti 2,7 km a u "šumu - 90 dBm/Hz" už při 0,9 km. Velmi důležitým parametrem pro službu VoIP je právě jitter. Maximální hodnota jitter je pro IP hovory připouštěna do 30 ms. Tento limit je splněn v celém rozsahu testované metalické trasy v upstreamu (bez šumu, modul 458-LM-HDE) a downstreamu do vzdálenosti 4,5 km. V případě šumu -90 dB/Hz je limitující opět směr downstream a to od vzdálenosti 1,8 km. Připojení optické trasy způsobilo nárůst jitter jen ve směru downstream a to jen od určité vzdálenosti metalické trasy (od 2,4 km - bez šumu).



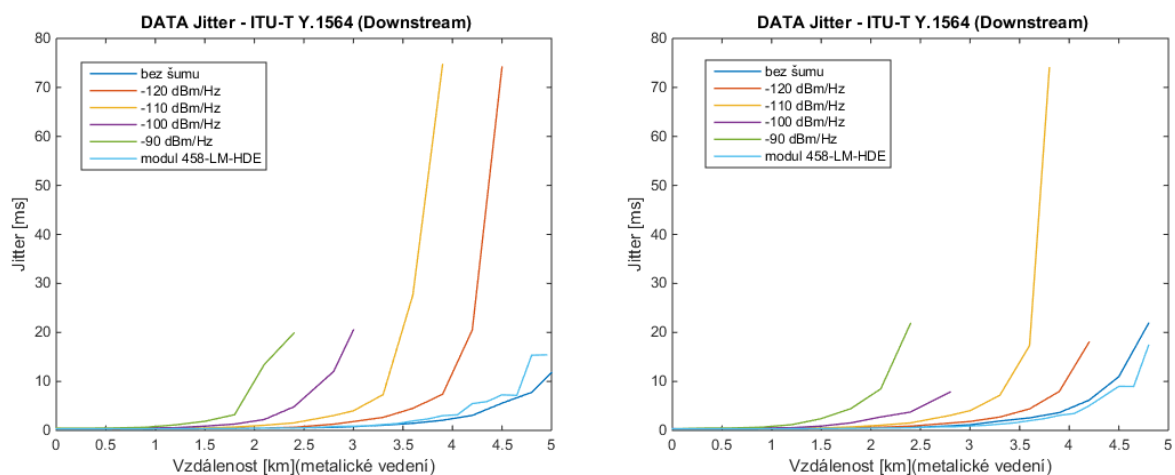
Obrázek 134: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ JITTER - VoIP - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



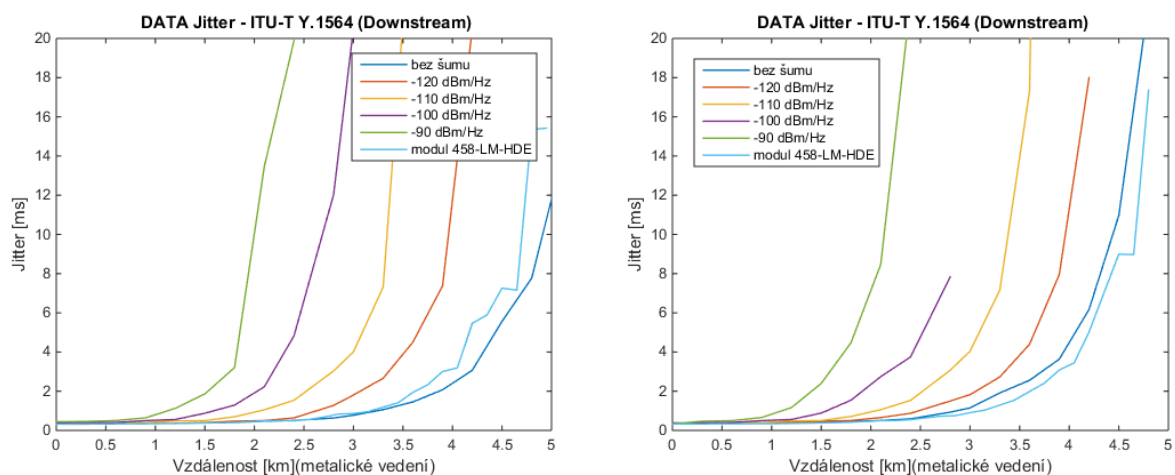
Obrázek 135: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ JITTER - VoIP - DOWNSTREAM - Výřez - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



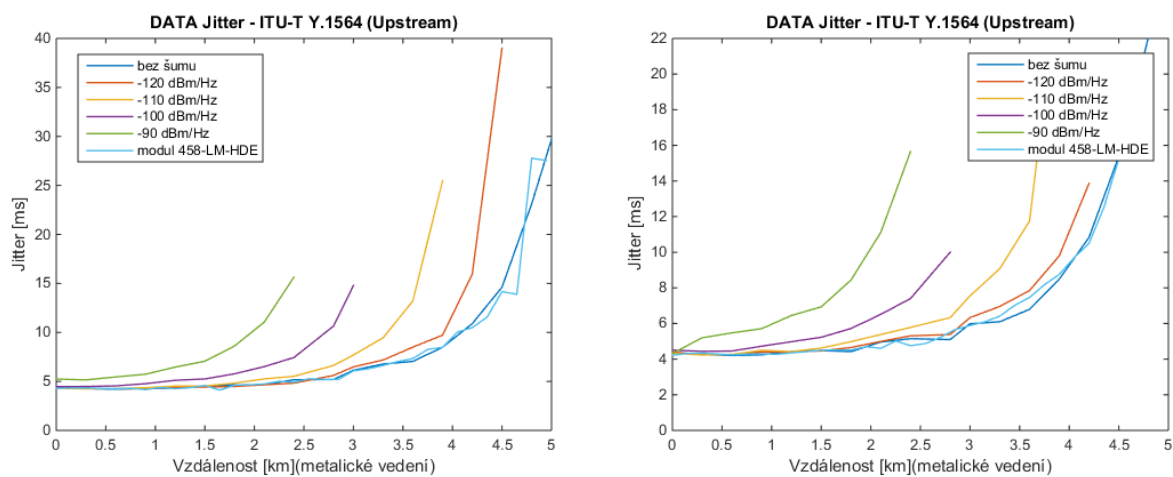
Obrázek 136: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ JITTER - VoIP - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 137: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ JITTER - DATA - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



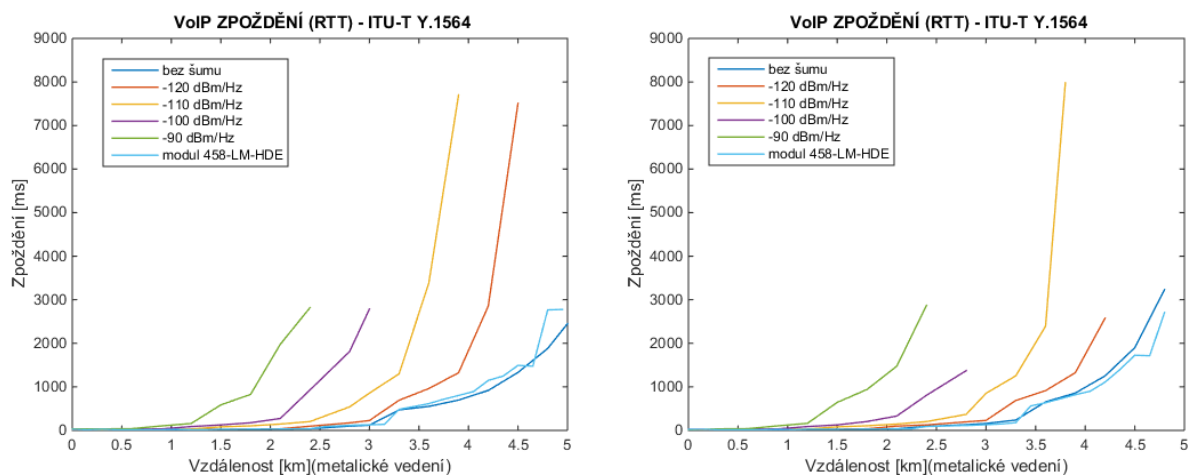
Obrázek 138: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ JITTER - DATA - DOWSTREAM - Výřez - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



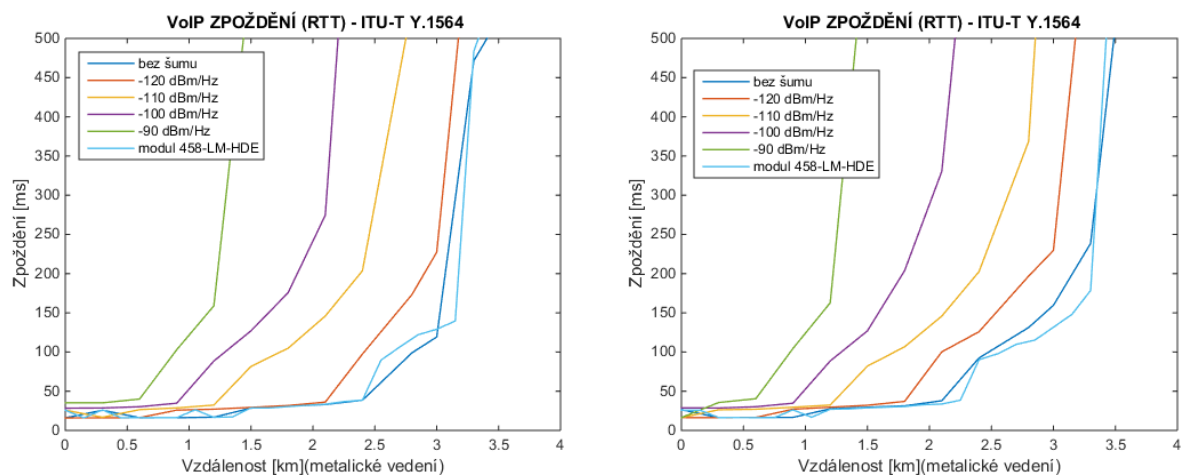
Obrázek 139: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ JITTER - DATA- UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.2.5.4 ITU-T Y.1564 - ZPOŽDĚNÍ- EPON/CWDM/ADSL2+

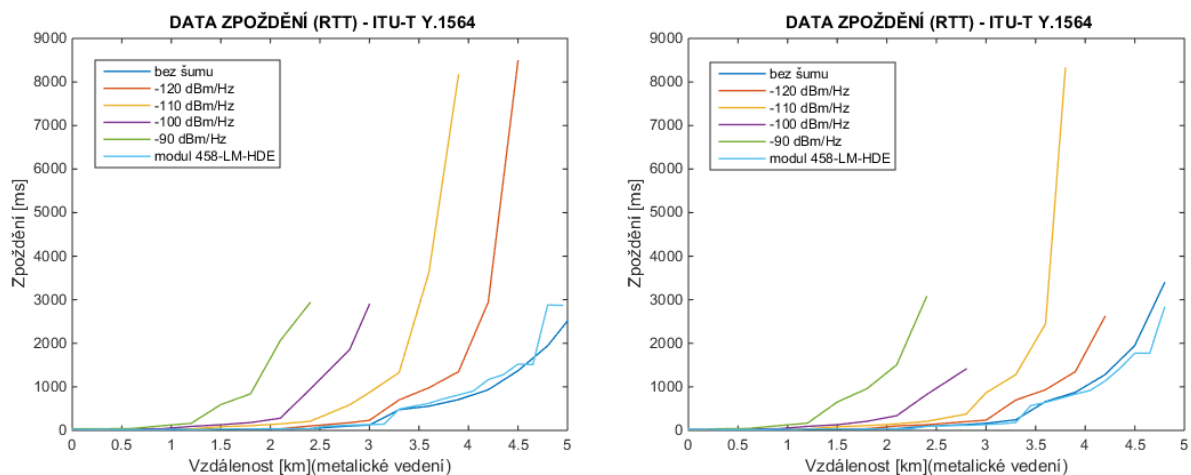
Změřené hodnoty zpoždění zde reprezentují obousměrné zpoždění (RTT - Round-Trip Time). Hodnoty zpoždění jsou nejmenší u služby VoIP, ale tento rozdíl oproti datové službě je velmi malý. Například při nastavení "bez šumu" byl tento rozdíl do 3,6 km maximálně 5 ms. S rostoucí délkou tento rozdíl narůstal. S připojením optické trasy se hodnoty zpoždění do vzdálenosti 2,4 km lišily jen minimálně. Po překonání 2,4 km byl rozdíl markantnější. Pro citlivou službu, kterou je VoIP, byla stanovena horní mez na 400 ms (jednocestné zpoždění). Vezmeme-li v potaz, že jednocestné zpoždění se rovná polovině obousměrného zpoždění, lze výsledky snadno porovnat. Hodnoty pod 400 ms je dosaženo v případě "bez šumu" do 4 km. Dále do 3 km byla splněna podmínka 150 ms, což je považováno za velmi vhodné zpoždění v rámci VoIP. Naopak datová služba není citlivá na zpoždění, a proto není potřeba dbát na nízké hodnoty zpoždění.



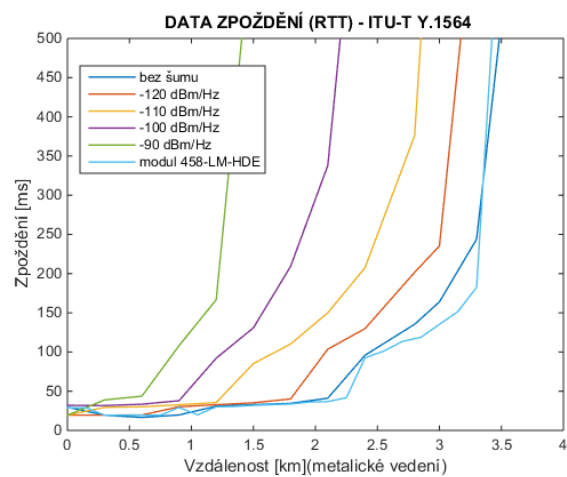
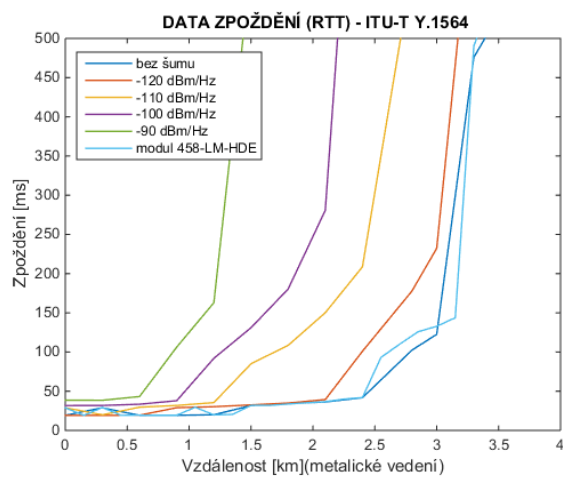
Obrázek 140: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - VoIP - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 141: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - VoIP - DOWNSTREAM - Výřez - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 142: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - DATA - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



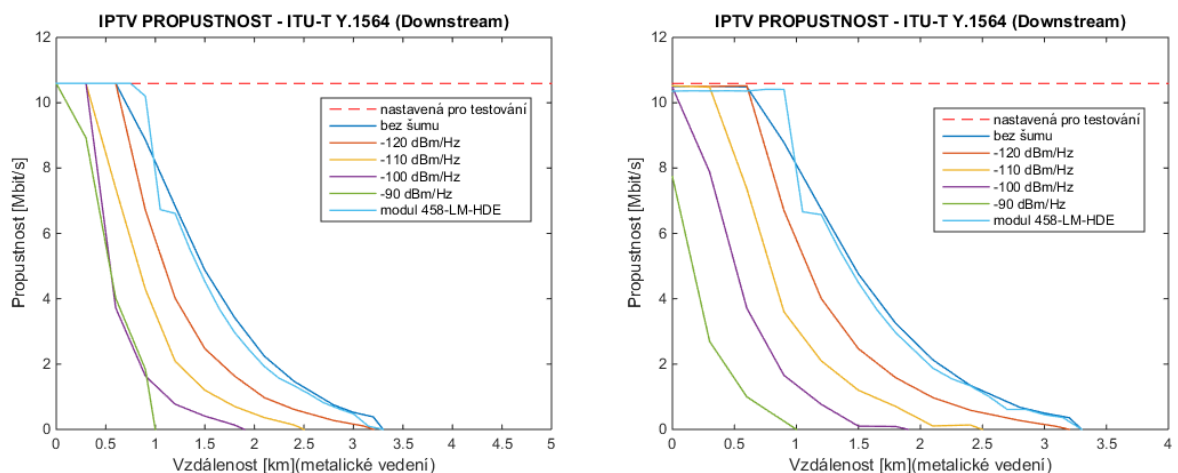
Obrázek 143: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - DATA - DOWNSTREAM
- Výřez - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.2.6 ITU-T Y.1564 pro hybridní síť EPON/CWDM/VDSL2

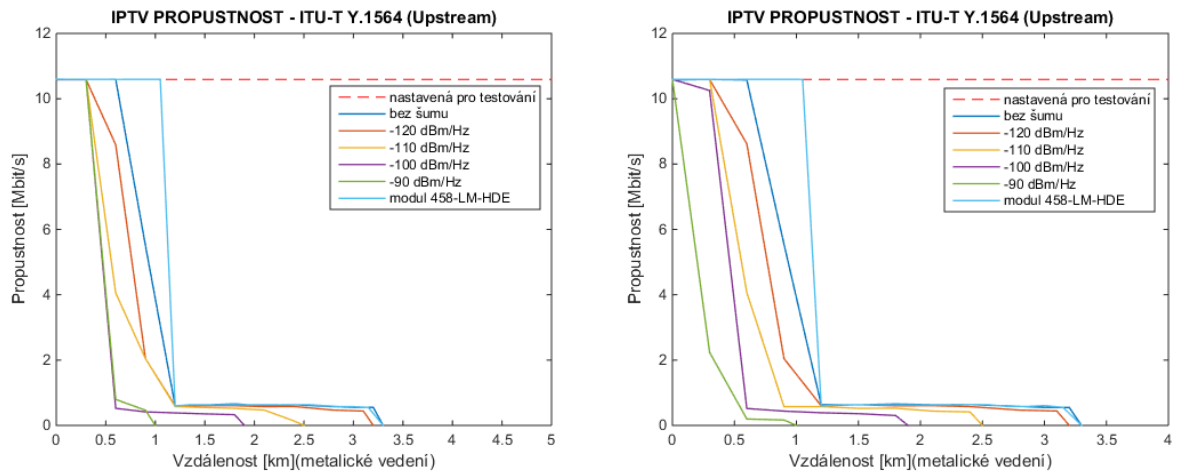
Na obrázcích níže jsou zobrazeny v grafech naměřené hodnoty propustnosti, ztrátovosti, zpoždění a kolísání zpoždění (jitter). Tyto KPI parametry byly získány při výkonostním testu služeb, kdy se testovaly všechny 3 služby současně. Měření proběhlo na portu č. 12 s přenosovou rychlostí 63,968 Mbit/s v sestupném směru a 35,968 Mbit/s ve vzestupném směru (změřeno modemem). Pro metalickou trasu byl využit simulátor vedení Telebyte 458-3SL(modul 458-LM-HDE) a Spirent DLS6900 s nastavitelným vložným šumem. Pro testování RFC6349 byly použity hodnoty šumu v rozmezí -120 dBm/Hz až -90 dBm/Hz.

10.2.6.1 ITU-T Y. 1564 - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - EPON/CWDM/VDSL2+

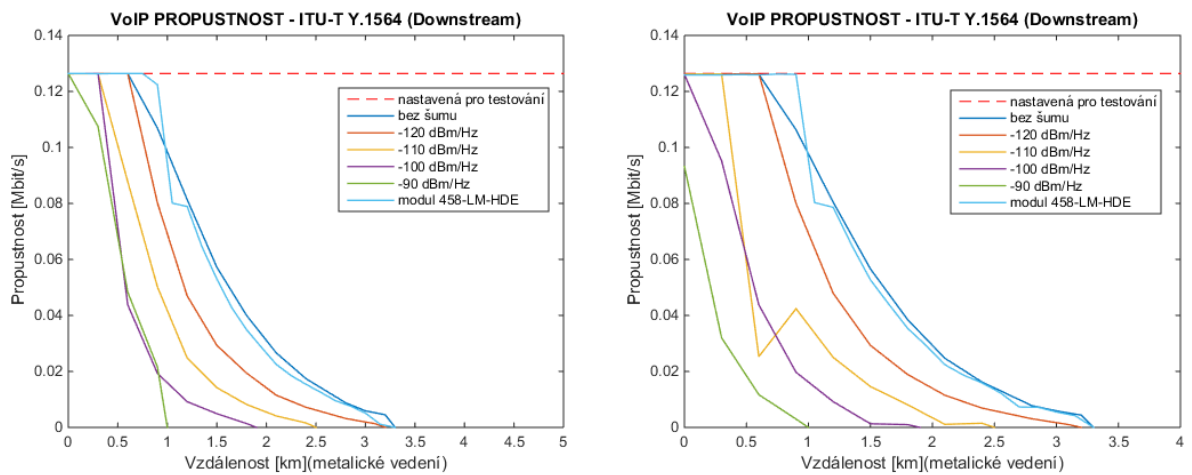
Při současném využívání všech 3 služeb najednou, bylo možné podle naměřených výsledků IPTV provozovat až maximálně do vzdálenosti 750 m metalické trasy (modul 458-LM-HDE). S přidáním šumu se tato vzdálenost zmenšovala. Při nastavení šumu - 90 dBm/Hz byla vždy změřena propustnost menší než požadovaná hodnota. Připojení optické trasy mělo pozitivní vliv na modul 458-LM-HDE, kdy se max. vzdálenost metalického vedení prodloužila o 150 m. Na druhé straně optická trasa negativně působila na nastavení se šumem -100 a -90 dBm/Hz. Pokud jen přijímáme IPTV signál ze serveru není pro nás směr upstream důležitý, jelikož při příjmu IPTV se neuplatňuje. V případě posílání videa do sítě (generování IPTV proudu) již nabývá důležitosti. Výsledky v upstreamu jsou velmi podobné jako v downstreamu s výjimkou modulu 458-LM-HDE, kde došlo k prodloužení vzdálenosti alespoň o 150 m. Navíc v určitém okamžiku dochází k prudkému poklesu propustnosti. Velmi podobných výsledků bylo dosaženo i pro VoIP a DATA. Prakticky při stejné vzdálenosti metalického vedení docházelo k poklesu potřebné propustnosti všech 3 služeb najednou.



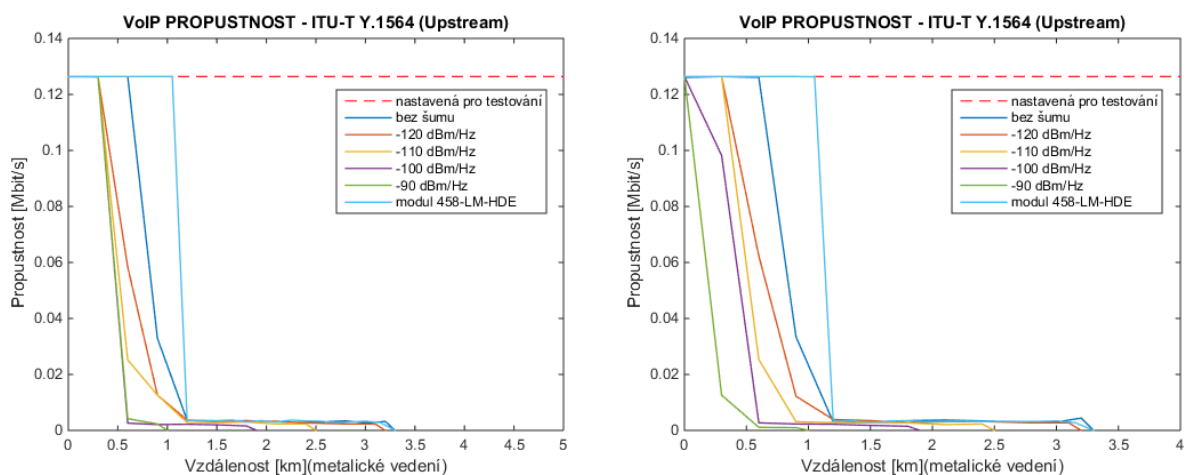
Obrázek 144: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - IPTV - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



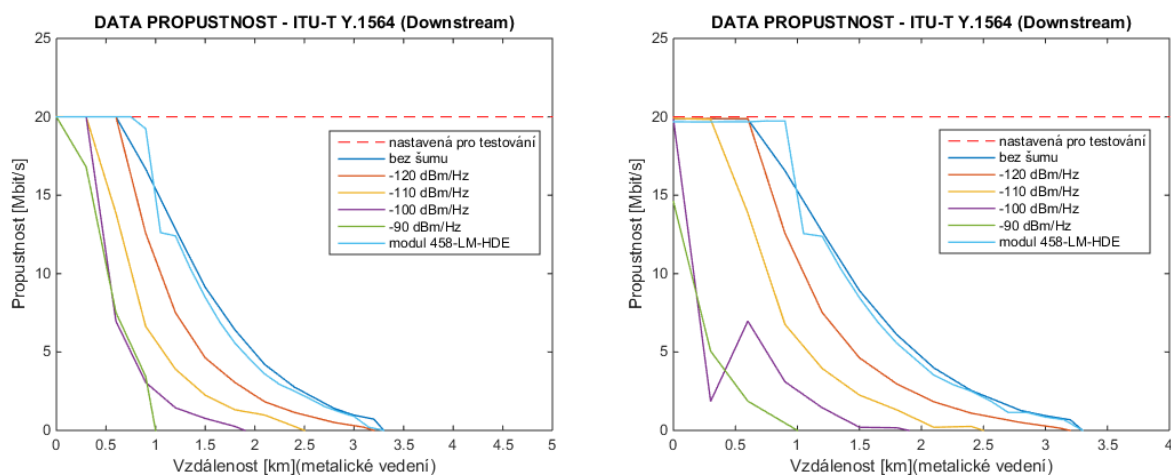
Obrázek 145: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - IPTV - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



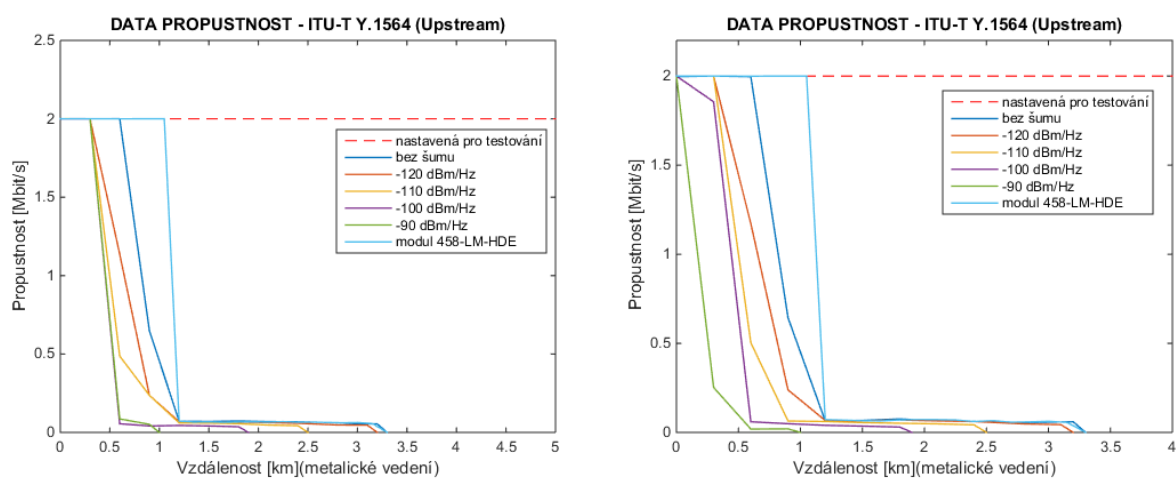
Obrázek 146: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - VoIP - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 147: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - VoIP - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



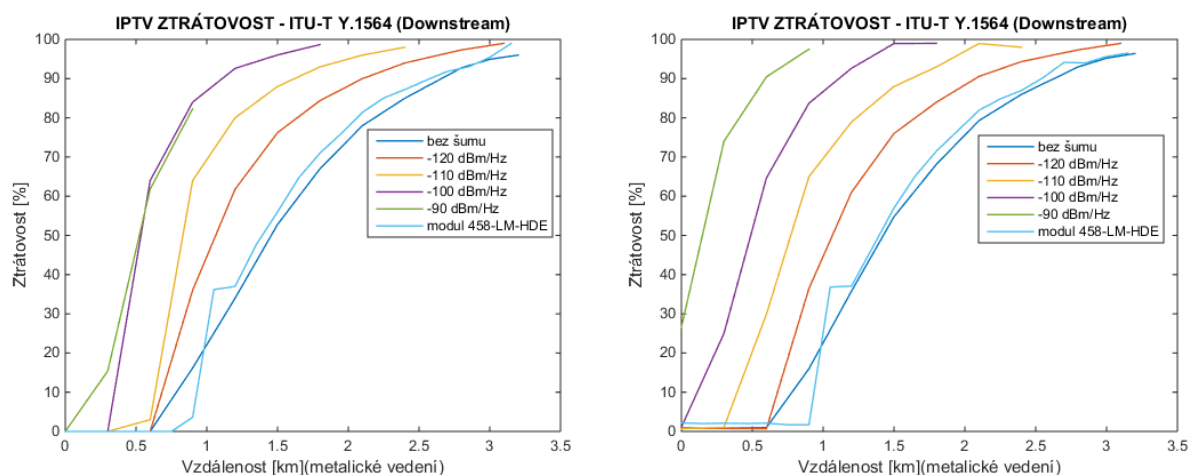
Obrázek 148: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - DATA - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



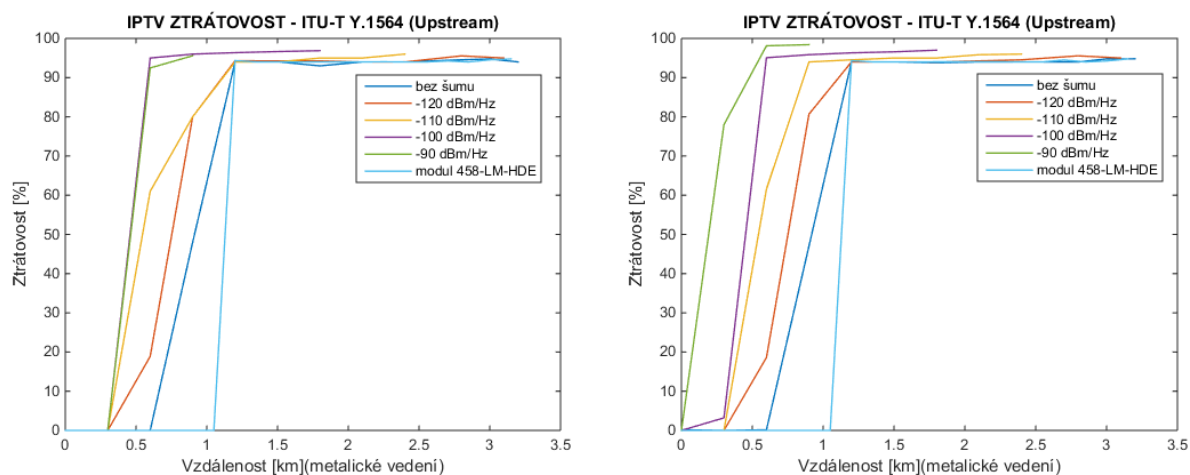
Obrázek 149: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ PROPUSTNOST - DATA - UPSTREAM
- bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.2.6.2 ITU-T Y.1564 - ZTRÁTOVOST- EPON/CWDM/VDSL2

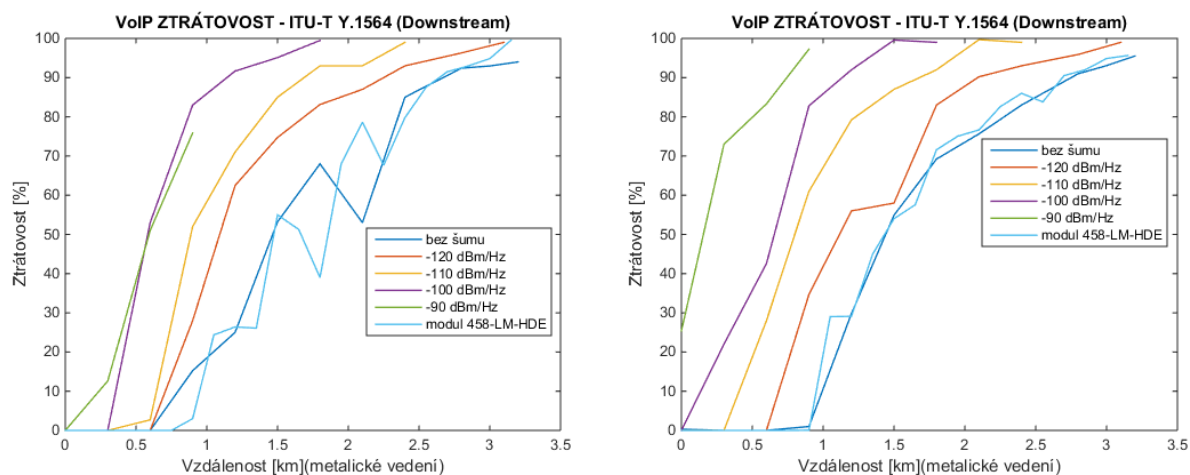
Ztrátovost byla hlavně ovlivněna velikostí přidaného šumu do trasy. K bezztrátovému přenosu docházelo u IPTV, VoIP a DAT až do vzdálenosti 600 m (bez šumu) a 750 m (modul 458-LM-HDE) v downstreamu. Po překonání této vzdálenosti měla ztrátovost tendenci extrémně narůstat. Při připojení optické trasy byla ztrátovost do těchto vzdáleností nulová, nebo se pohybovala pod hodnotou 1 %, tudíž připojená optická trasa měla jen slabý negativní vliv na hodnoty v downstreamu. Celkově hodnoty byly v upstreamu lehce horší u simulátoru Spirent DLS 6900. To naopak neplatilo u modulu 458-LM-HDE, kde se hranice bezztrátovosti posunula na hodnotu 1050 m. Optická trasa u upstream neměla téměř žádný vliv.



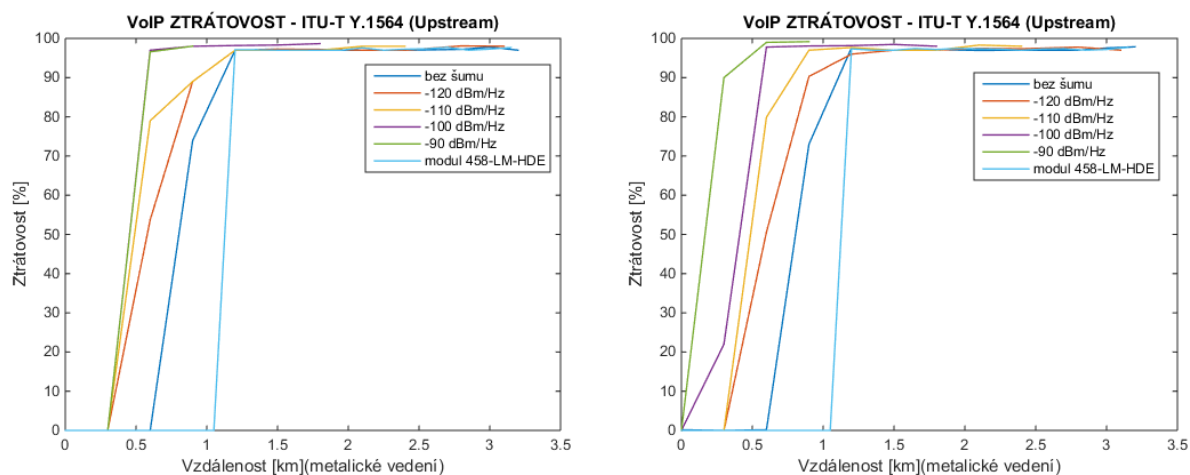
Obrázek 150: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - IPTV - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



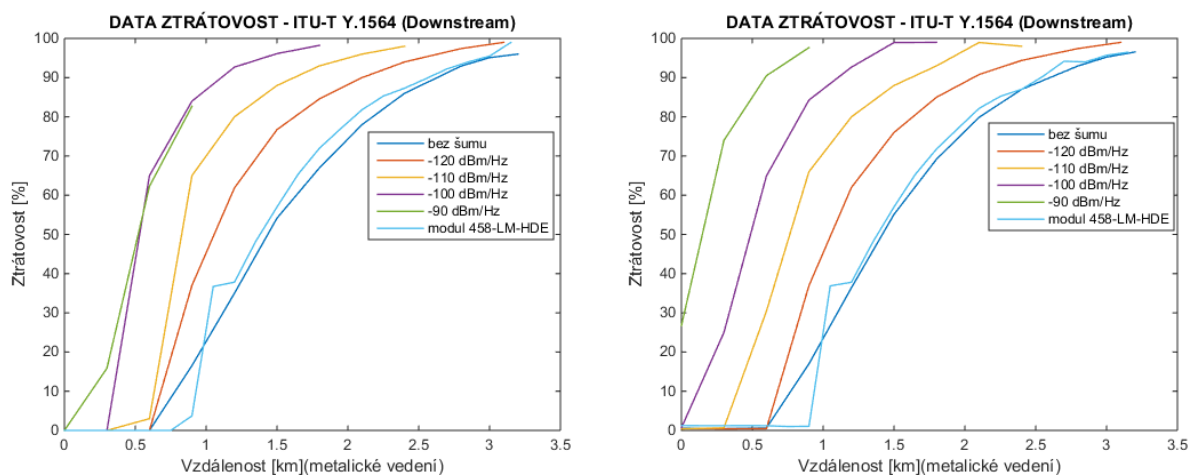
Obrázek 151: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - IPTV - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



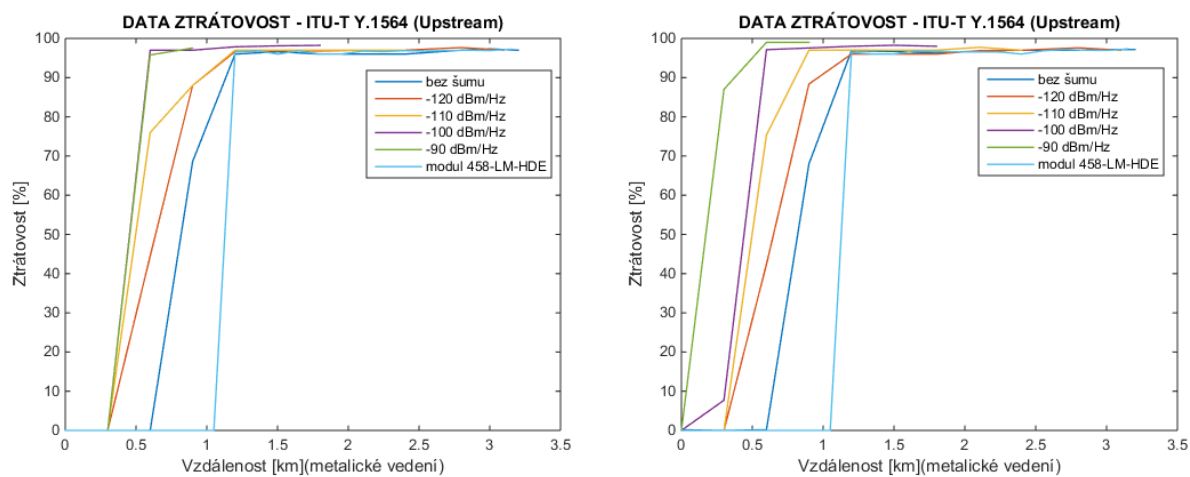
Obrázek 152: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - VoIP - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 153: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - VoIP - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



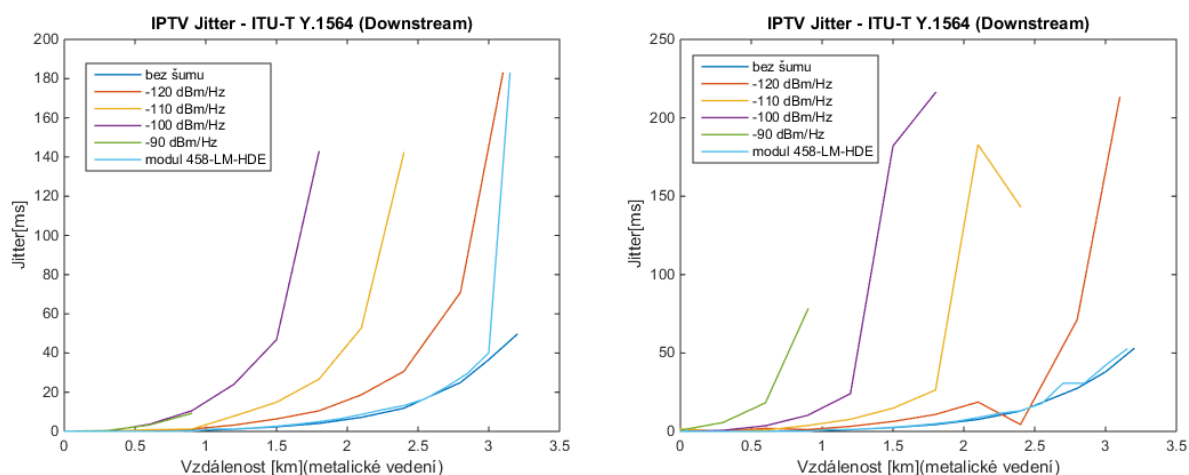
Obrázek 154: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - DATA - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



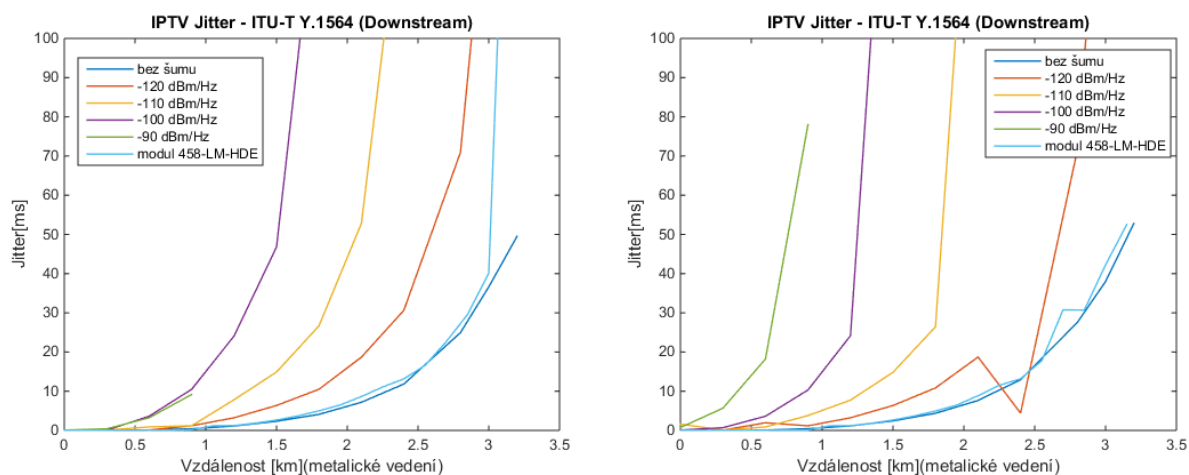
Obrázek 155: ITU-T Y.1564 ADSL2+ - PRŮMĚRNÁ ZTRÁTOVOST - DATA - UPSTREAM
- bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.2.6.3 ITU-T Y. 1564 - PRŮMĚRNÉ JITTER - EPON/CWDM/VDSL2+

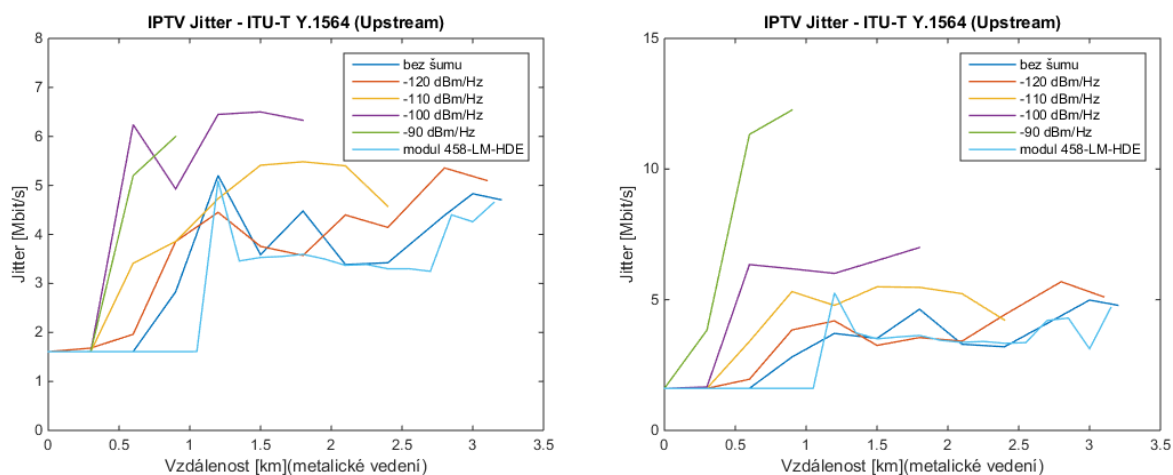
Při porovnávání upstreamu a downstreamu je velmi viditelné, že hodnoty kolísání zpoždění (jitter) jsou menší v downstreamu, ale až do nějaké určité vzdálenosti (1,8 km pro IPTV, 3 km pro DATA, 0,9 km VoIP v případě "bez šumu"). Dále jitter IPTV v downstreamu disponuje daleko menšími hodnotami než u VoIP. Nejmenší hodnoty jitter byly naměřeny u služby DATA. Připojení optické trasy mělo téměř nulový vliv na hodnoty kolísání zpoždění. Velmi důležitým parametrem je jitter pro službu VoIP. Maximální hodnota jitter je pro IP hovory připouštěna do 30 ms. Tento limit je splněn do vzdálenosti 2,1 km (bez šumu, modul 458-LM-HDE). V případě šumu -90 dB/Hz je tato podmínka splněna do 0,9 km.



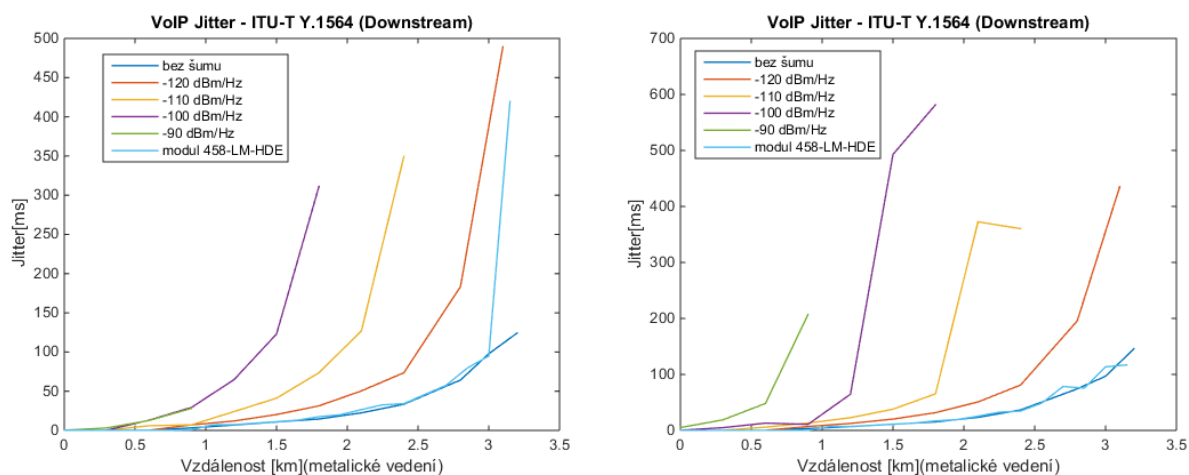
Obrázek 156: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - IPTV - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



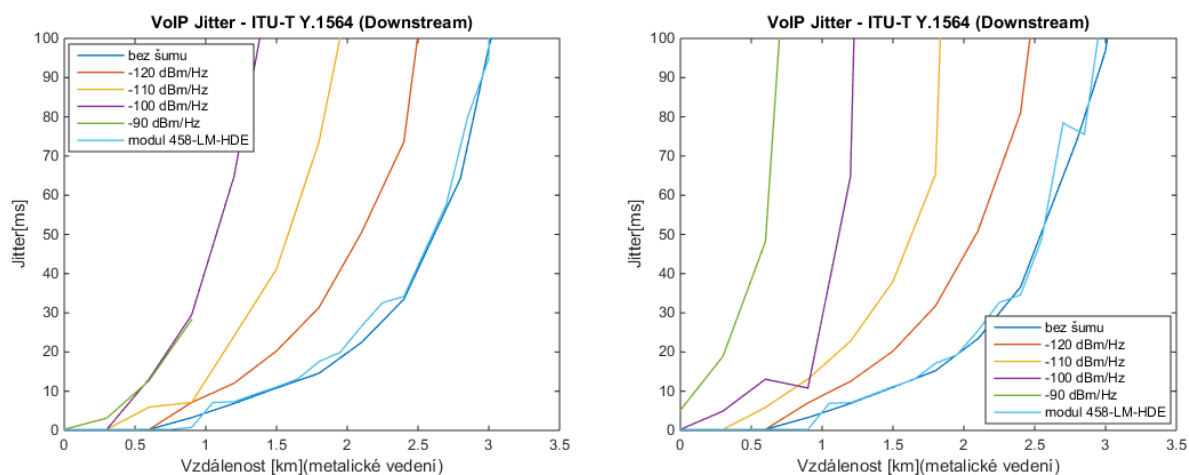
Obrázek 157: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - IPTV - DOWNSTREAM - Výřez do 100 ms- bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



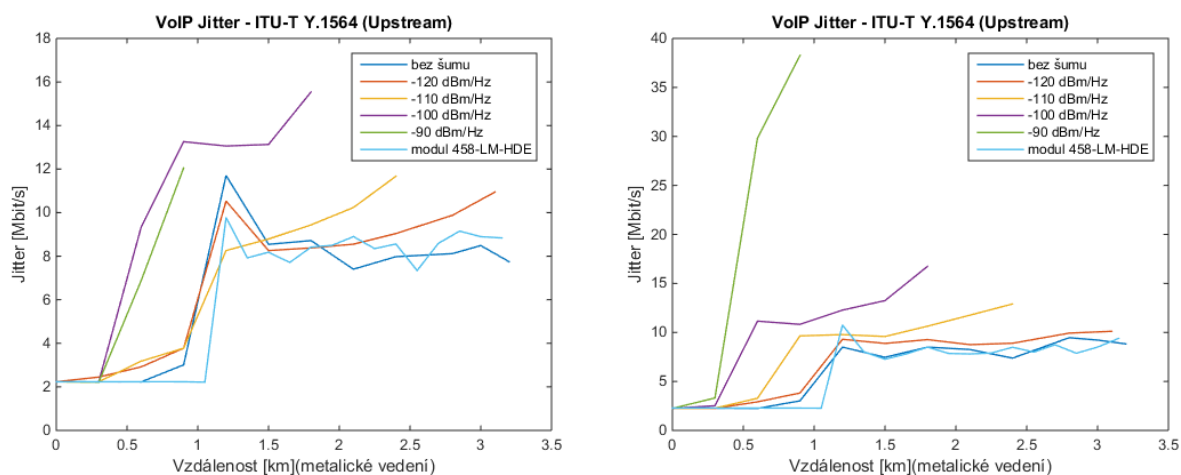
Obrázek 158: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - IPTV - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



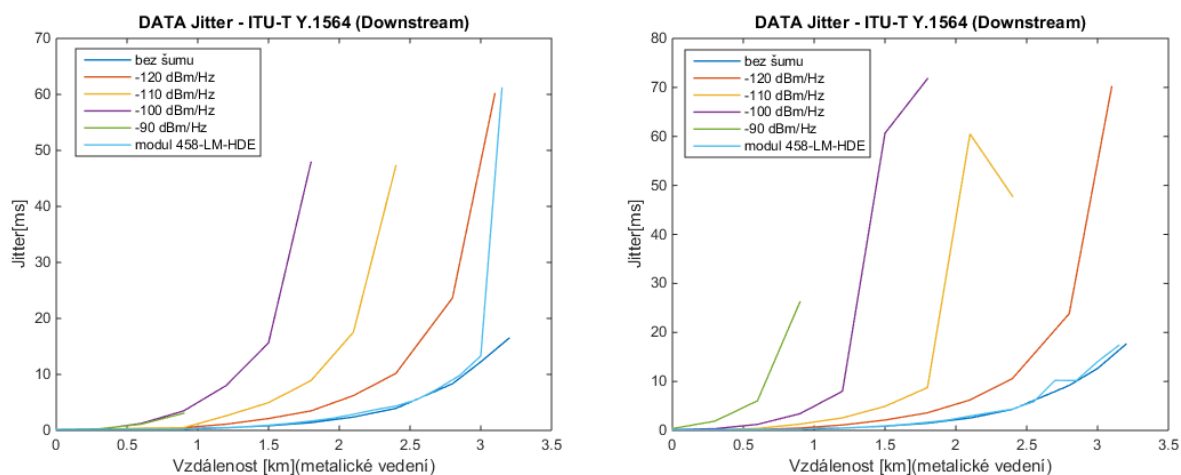
Obrázek 159: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - VoIP - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



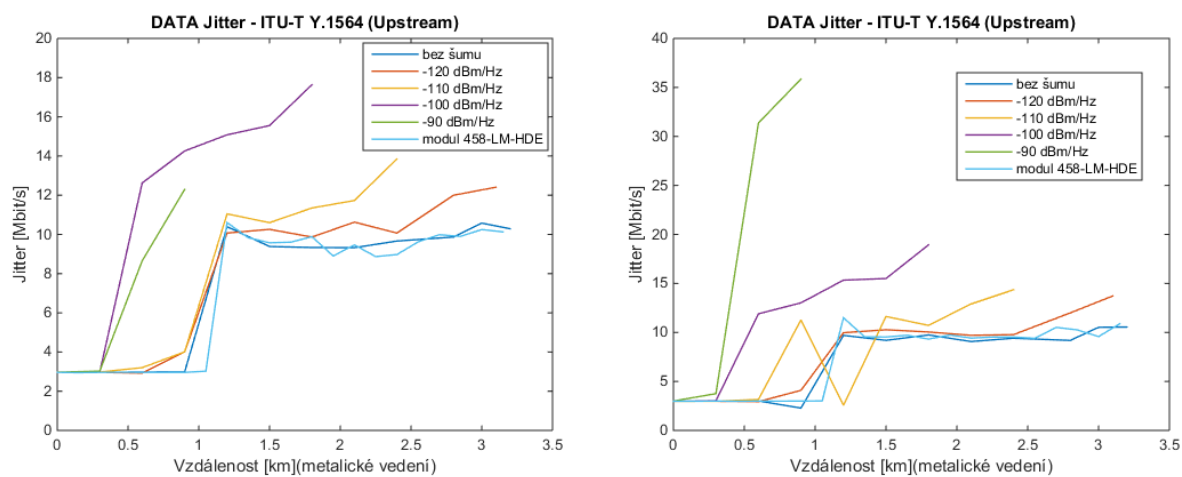
Obrázek 160: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - VoIP - DOWNSTREAM - Výřez do 100 ms - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 161: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - VoIP - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



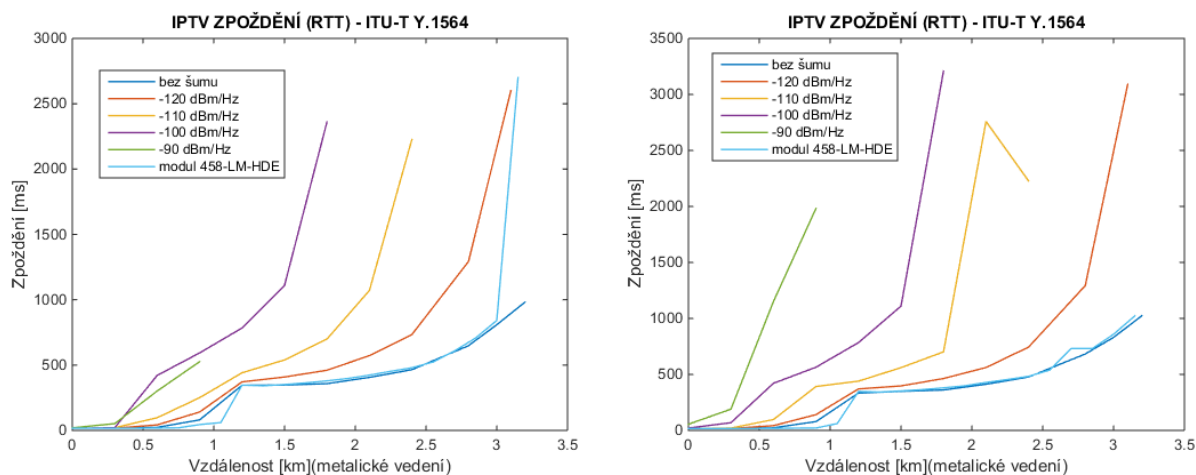
Obrázek 162: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - DATA - DOWNSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



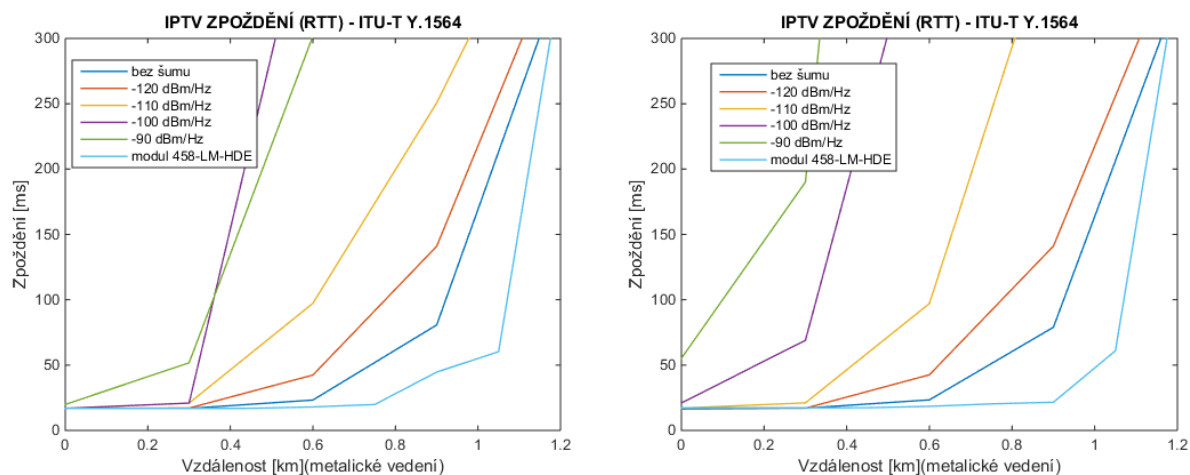
Obrázek 163: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ JITTER - DATA - UPSTREAM - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.2.6.4 ITU-T Y.1564 - ZPOŽDĚNÍ- EPON/CWDM/VDSL2+

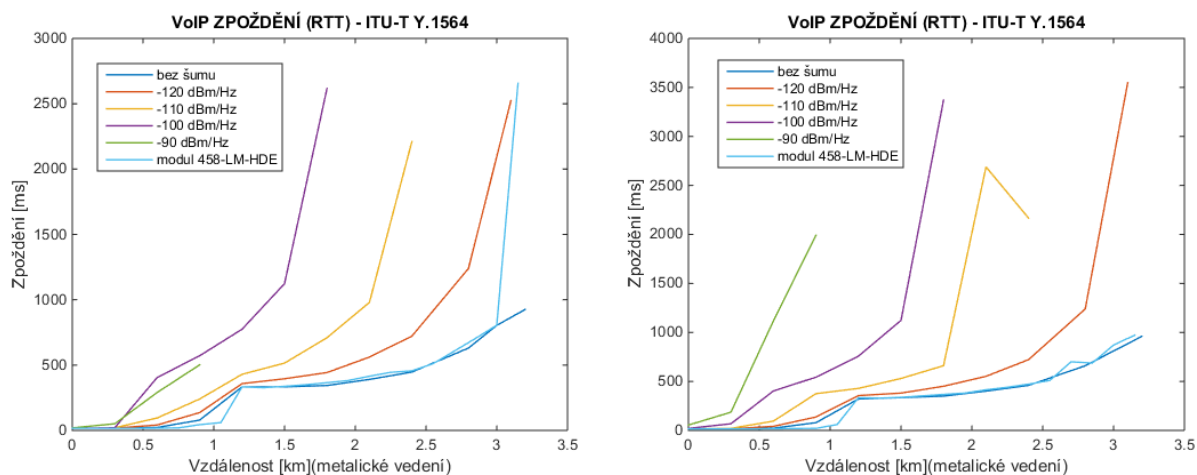
Změřené hodnoty zpoždění zde reprezentují obousměrné zpoždění (RTT - Round-Trip Time). Hodnoty zpoždění jsou nejmenší u služby IPTV, ale tento rozdíl je oproti ostatním službám velmi malý. Největších hodnot bylo dosaženo u IPTV. Například při nastavení "bez šumu" byl tento rozdíl do 0,9 km menší než 1 ms. S rostoucí délkou tento rozdíl narůstal (2,4 km - max 18 ms). S připojením optické trasy se hodnoty zpoždění lišily jen minimálně. Do vzdálenosti 0,9 km se lišily maximálně o 1 ms, po překonání této hranice už to bylo v řádech ms. Horní mez pro VoIP je stanovena na 400 ms (jednocestné zpoždění). Vezmeme-li v potaz, že jednocestné zpoždění se rovná polovině obousměrného zpoždění, lze výsledky snadno porovnat. Hodnoty pod 400 ms je dosaženo v případě "bez šumu" do 3 km. Dále do 1 km byla splněna podmínka 150 ms, což je považováno za velmi vhodné zpoždění v rámci VoIP.



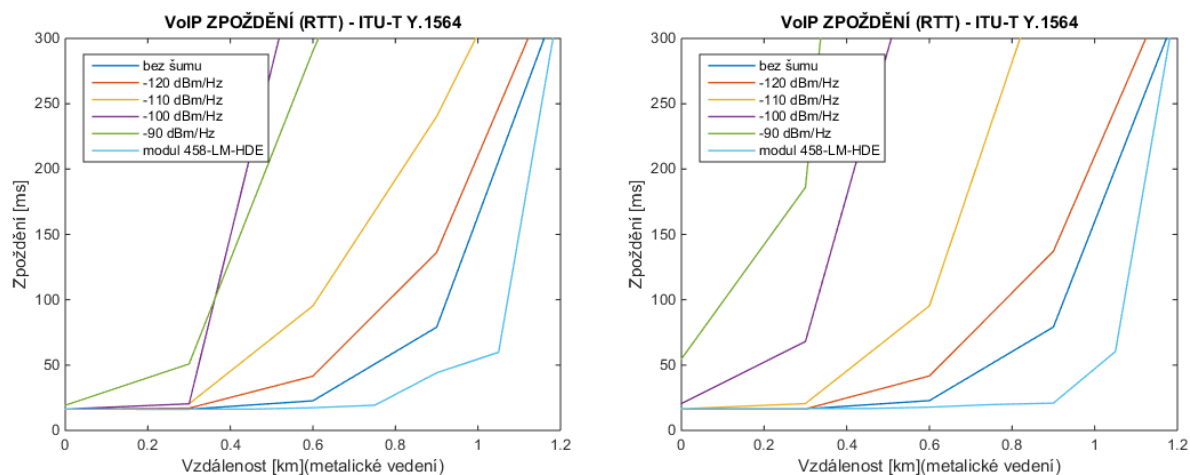
Obrázek 164: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - IPTV - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



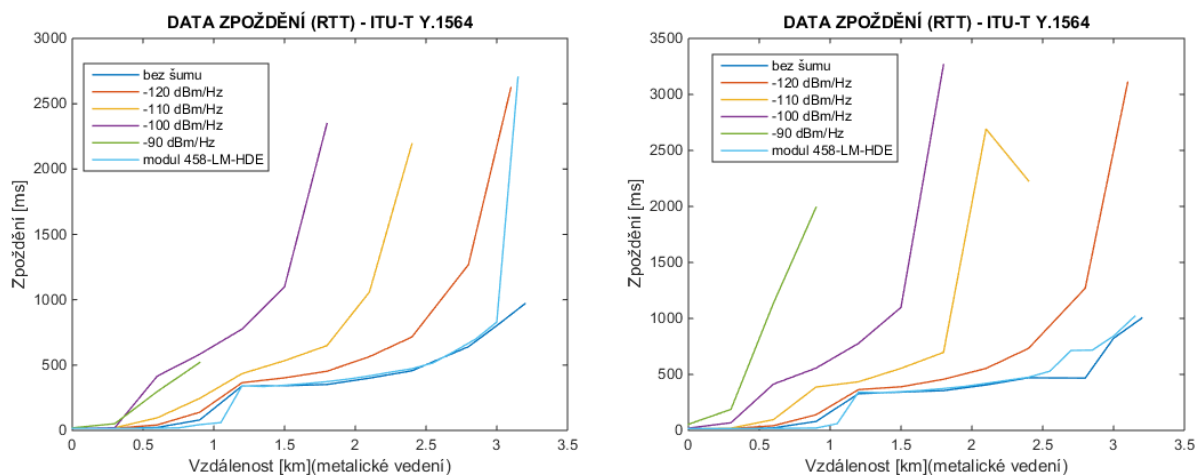
Obrázek 165: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - IPTV - Výřez do 300 ms - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



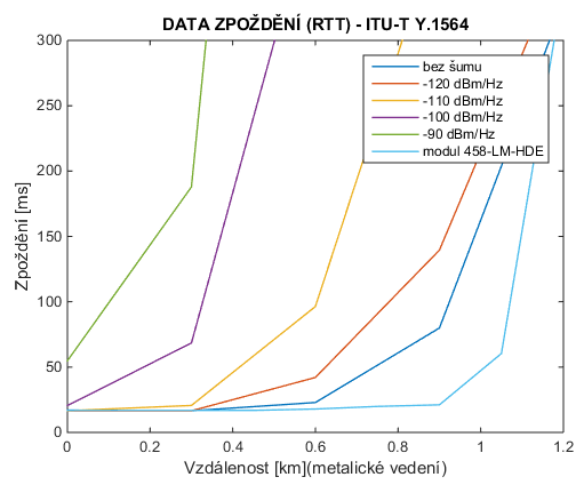
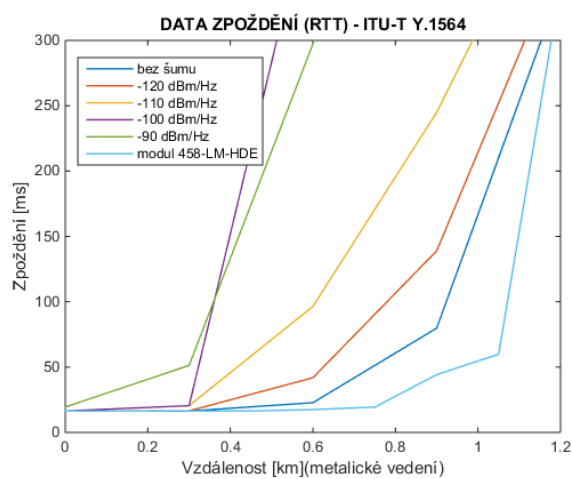
Obrázek 166: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - VoIP - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 167: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - VoIP- Výřez do 300 ms - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 168: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - DATA - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 169: ITU-T Y.1564 VDSL2 - PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ - DATA- Výřez do 300 ms - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

10.3 RFC 6349

Metoda RFC 6349 využívá pro ověření spolehlivosti sítě protokol TCP. Tento protokol je hlavně používán pro non-real time provoz v IP síti Internet, a proto metoda RFC 6349 je vhodným nástrojem pro měření parametrů. Metoda byla publikovaná v roce 2011 a umožňuje obousměrné měření.

Postup metody při měření je následující:

1. **Zjištění MTU (Maximum Transmission Unit)** - Ke zjištění maximální přenosové jednotky (MTU) je využita standardizována technika Path MTU Discovery (PMTUD).
2. **Určení RTT (Round-Trip Time) a BB (Bottleneck Bandwidth)** - RTT definuje dobu mezi odesláním jednoho TCP segmentu z jedné stanice na druhou a následným přijetím potvrzovací zprávy (ACK) od stanice, na kterou byl segment zaslán. V případě BB se jedná o limitní přenosovou rychlost. Měření RTT a BB slouží pro výpočet BDP (Bandwidth Delay Product), TCP RWND (Receive Window) a velikostí Socket Bufferů. TCP RWND definuje maximální množství dat, které je možné odeslat vysílačem v daném okamžiku do sítě. Kdyby došlo k odeslání většího množství dat, než je definované v okénku přijímače (RWND), došlo by k zahlcení přijímací stanice. BDP představuje množství dat, které je možné odeslat, než odesílatel obdrží potvrzovací zprávu od příjemce. Získané parametry poté slouží k nastavení přijímací a vysílací strany.
3. **Test TCP propustnosti** - Test s jedním nebo více TCP spojením. [17]

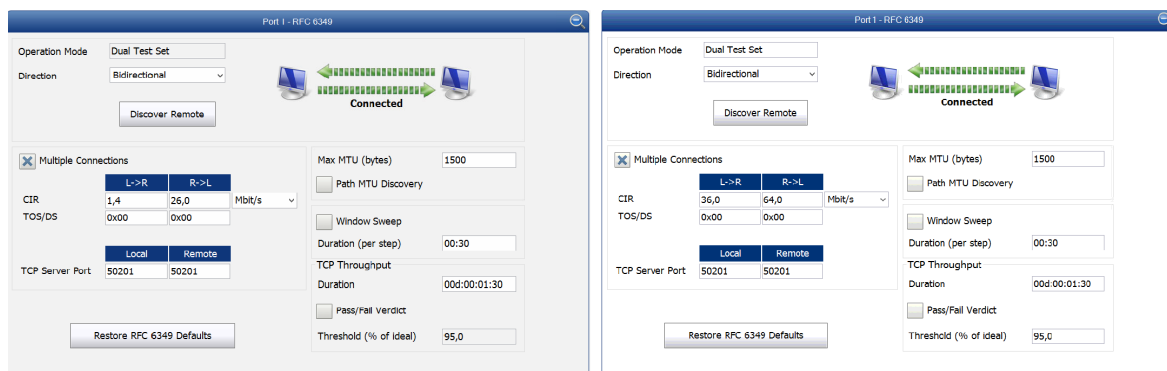
Pro lepší porozumění a porovnáváním výsledků metody RFC 6349 se vyhodnocuje TCP propustnost na základě 3 základních metrik:

- **Transfer Time Ratio** - Jedná se o poměr mezi aktuální hodnotou doby přenosu TCP segmentu a ideální hodnotou doby přenosu TCP segmentu.
- **TCP Efficiency** - Efektivita přenosu dat přes TCP spojení. Jedná se o procentuální vyjádření množství bitů, které nemuseli být opakovaně přenášeny.
- **Buffer Delay** - Údaj je uváděn v procentech a podává informaci o zvýšení hodnoty RTT během testu TCP propustnosti oproti výchozí hodnotě vlivem vyrovnávací paměti. Nejprve je nutno vypočítat průměrnou hodnotu RTT, a to tak, že se sečtou všechny hodnoty RTT z aktuálního testu (1 hodnota RTT odpovídá 1 sekundě) a vydělí se celkovou dobou testu v sekundách. Výchozí hodnota RTT odpovídá nezatížené síti. [17]

$$\text{Průměrná hodnota RTT} = \frac{\text{Součet všech RTT během testu}}{\text{Doba testu v sekundách}} \quad (3)$$

$$Buffer\ Delay[\%] = \frac{(Průměrná\ hodnota\ RTT - Východí\ hodnota\ RTT) * 100}{Východí\ hodnota\ RTT} \quad (4)$$

Test RFC 6349 byl vykonán pomocí dvou přístrojů FTB-1 podle zapojení na obrázku č. 74. Měření probíhalo v režimu Dual Test, což umožňovalo měřit současně sestupný a vzestupný směr. Na začátku bylo potřeba nastavit hodnotu CIR a MTU. Ostatní parametry je schopen si měřící přístroj stanovit sám. Do pole s parametrem CIR byla zadána hodnota BB. Hodnota BB odpovídá nejnižší přenosové kapacitě celé trasy na fyzické vrstvě. Limitní technologií v této hybridní síti je systém xDSL, proto byly využity hodnoty, které byly naměřeny pomocí modemu (VDSL2) a VeEX VePAL VX100V (ADSL2+). Pro ADSL2+ byla zvolena hodnota 26 Mbit/s (downstream) a 1,4 Mbit/s (upstream). Pro VDSL2 64 Mbit/s (downstream) a 36 Mbit/s (upstream). Parametr Max Transfer Unit (MTU) byl zvolen na hodnotu 1500 B. Vstupní nastavení je možné si prohlédnout na obrázku č. 170.



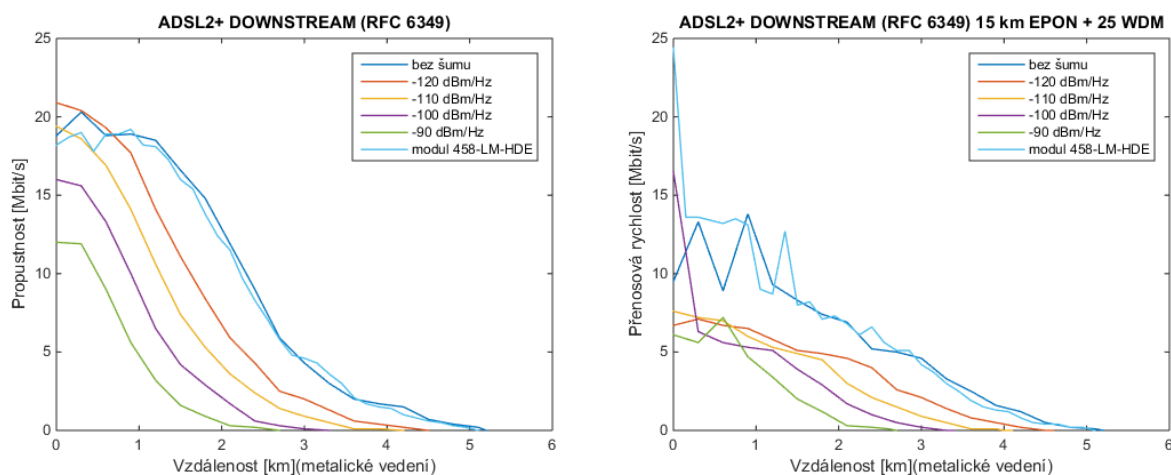
Obrázek 170: Vstupní parametry RFC 6349 pro ADSL2+ (vlevo) a VDSL2 (vpravo).

10.3.1 RFC 6349 - PROPUSTNOST - pro hybridní síť EPON/CWDM/ADSL2+

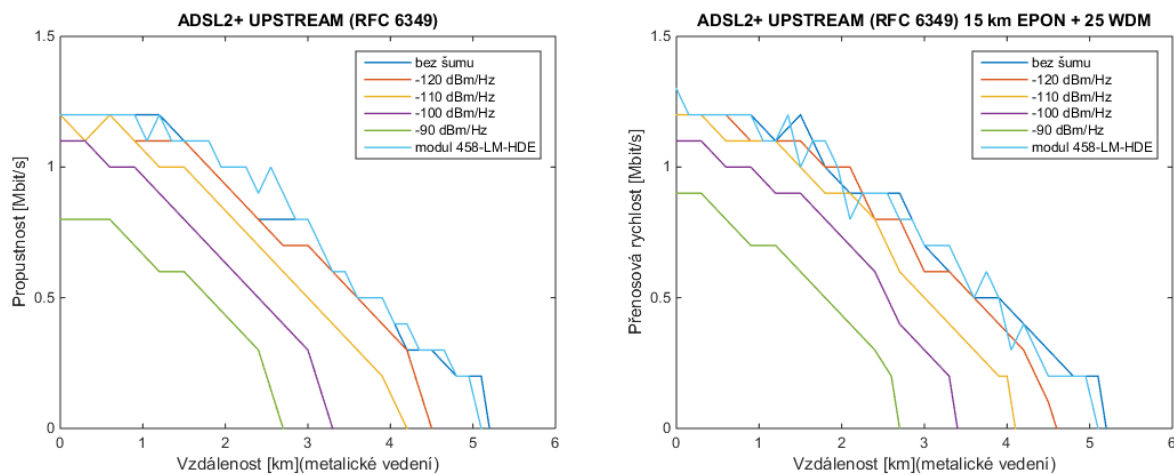
Na obrázcích č. 171 a č.172 jsou zobrazeny v grafech naměřené hodnoty TCP propustnosti na L4 (Transport layer). V sestupném směru jsou hodnoty pochopitelně větší než ve vzestupném směru. Měření proběhlo na portu č. 10 s přenosovou rychlostí 26 Mbit/s v sestupném směru a 1,2 Mbit/s ve vzestupném směru (změřeno pomocí VeEx VePAL BX100V). Pro metalickou trasu byl využit simulátor vedení Telebyte 458-3SL(modul 458-LM-HDE) a Spirent DLS6900 s nastavitelným vložitelným šumem. Pro testování RFC6349 byly použity hodnoty šumu v rozmezí -120 dBm/Hz až -90 dBm/Hz.

Z naměřených výsledků je patrné, že maximální propustnosti kolem 20 Mbit/s bylo možné dosáhnout jen s minimální vzdáleností metalické trasy v downstreamu. Se vzrůstajícím šumem pochopitelně klesala i propustnost sítě. Při vzdálenosti 2,4 km metalického vedení byl zaznamenán pokles propustnosti na polovinu v případě nastavení "bez šumu" a "modul 458-LM-HDE".

Vlivem připojené optické trasy se propustnost snížila pod úroveň 15 Mbit/s (bez šumu a modul 458-LM-HDE) a ve všech případech se šumem (-120 až -90 dBm/Hz) až pod 7 Mbit/s. V opačném směru (upstream) byla maximální propustnost změřena 1,2 Mbit/s jak bez připojené optické trasy, tak i s připojenou optickou trasou. Navíc připojení optické trasy nemělo žádný vliv na hodnoty v upstreamu.



Obrázek 171: Propustnost ve sestupném směru RFC 6349 - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

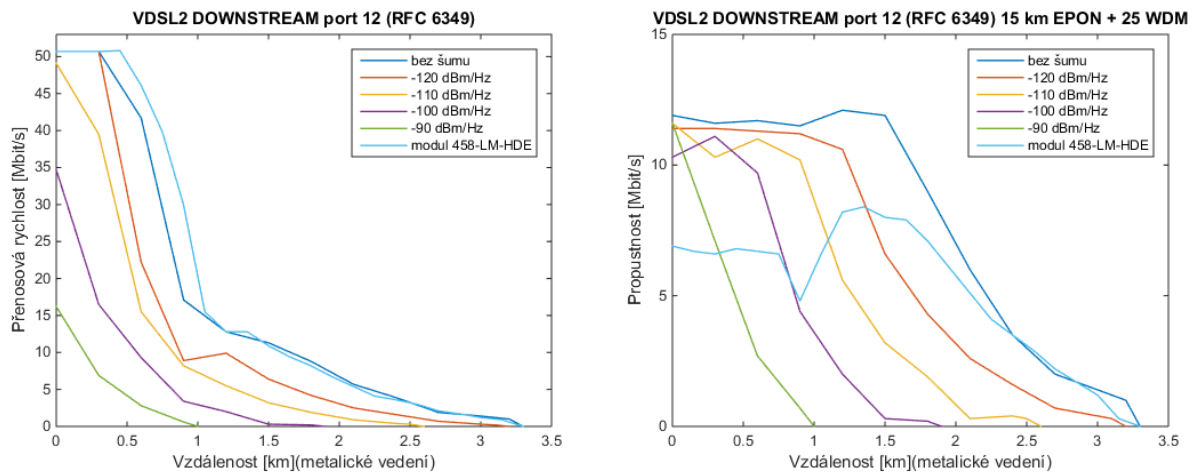


Obrázek 172: Propustnost ve vzestupném směru RFC 6349 - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

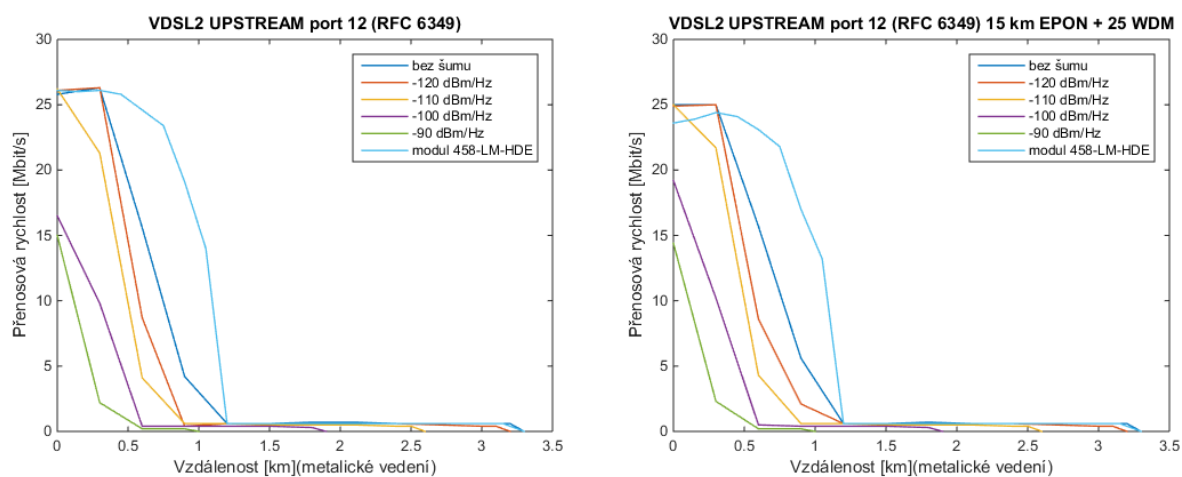
10.3.2 RFC 6349 - PROPUSTNOST - pro hybridní síť EPON/CWDM/VDSL2

Na obrázcích č. 173 a č. 174 jsou zobrazeny v grafech naměřené hodnoty TCP propustnosti na L4 (Transport layer). Schéma zapojení je shodné podle obrázku č.74. Měření proběhlo na portu č. 12 s přenosovou rychlostí 63,968 Mbit/s v sestupném směru a 35,968 Mbit/s ve vzestupném směru (měřeno modemem). Pro metalickou trasu byl využit simulátor vedení Telebyte 458-3SL(modul 458-LM-HDE) a Spirent DLS6900 s nastavitelným vložitelným šumem. Pro testování RFC6349 byly použity hodnoty šumu v rozmezí -120 dBm/Hz až -90 dBm/Hz.

Ačkoliv modemem byla změřena hodnota přibližně 64 Mbit/s v downstreamu, tak pomocí testu RFC 6349 byla zaznamenána maximální propustnost kolem 50 Mbit/s. To je taky dáno tím, že modem zobrazuje přenosovou rychlost na fyzické vrstvě (L1) a RFC 6349 měří hodnoty na transportní vrstvě (L4). U upstreamu hodnota 36 Mbit/s (změřená modemem) klesla na hranici 26 Mbit/s (RFC 6349). Pokles TCP propustnosti na 50 % u downstreamu byl zaznamenán při 0,8 km v případě "bez šumu". Hodnoty v upstreamu klesaly strměji, a proto už při 0,7 km došlo k poklesu na polovinu TCP propustnosti (bez šumu). V případě modulu 458-LM-HDE pokles byl zaznamenán na 50 % maximální hodnoty ve vzdálenosti 1,05 km u upstreamu. V tomto směru docházelo k prudkému poklesu hodnoty TCP propustnosti při určité hodnotě šumu a metalické trasy. Připojení optické trasy nemělo žádný vliv na hodnoty ve směru vzestupném (upstream) stejně jako v případě ADSL2+. Optická trasa ovlivnila jen hodnoty v downstreamu, kde byl zaznamenán pokles z 50 Mbit/s na hodnotu 12 Mbit/s u simulátoru vedení Spirent 6900 DLS. U simulátoru vedení Telebyte 458-3SL(modul 458-LM-HDE) byl zaznamenán pokles vyšší a to až na 8 Mbit/s. Z průběhu grafu si lze i všimnout, že s připojenou optickou trasou hodnoty v downstreamu neklesaly tak strmě, jak v případě bez trasy.



Obrázek 173: Propustnost v sestupném směru RFC 6349 - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



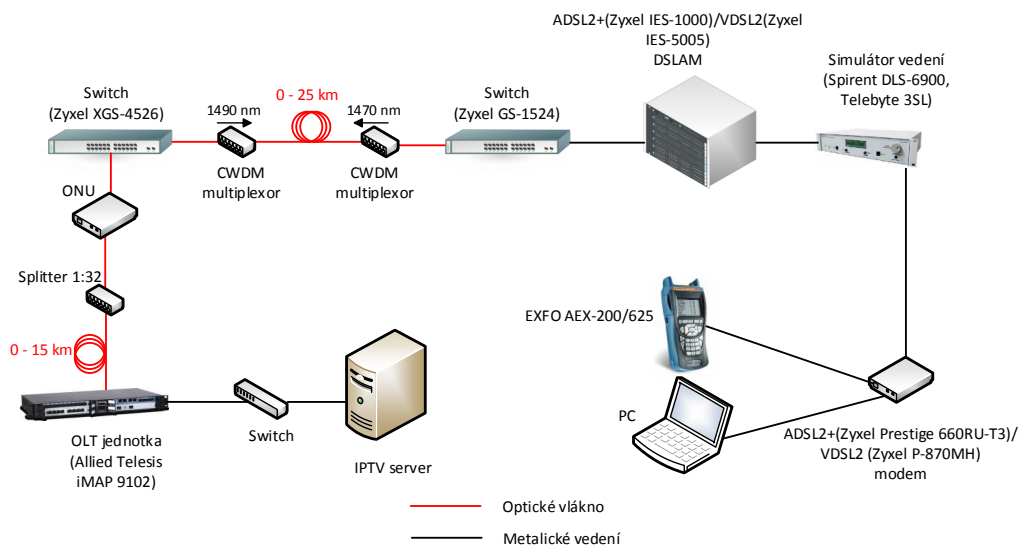
Obrázek 174: Propustnost ve vzestupném směru RFC 6349 - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

11 Měření kvality Triple play služeb

Na vybudované hybridní síti bylo provedeno měření kvalitativních parametrů Triple play služeb (IPTV, VoIP, Data) pomocí softwarových aplikací kromě IPTV, kde byl využit hardwarový přístroj AXS-200/625. V rámci testu VoIP byl využit software IxChariot. Pro měření přenosové rychlosti při stahování a nahrávání dat byl využit program BW meter. Kromě přístroje AXS-200/625 byl pro IPTV využit software MSU Video Quality Measurement Tool.

11.1 IPTV

Předmětem analyzování byl multicastový provoz, který byl vytvořen na IPTV serveru pomocí softwaru VLC. Celý postup vytvoření IPTV streamu (proudu) byl popsán již výše. IPTV server fungoval jako virtuální stroj na serveru ABACUS. Pro zkoumání parametrů multicastového provozu byl využit přístroj EXFO AXS-200/625. Pro testování IPTV bylo využito HD video s kodekem h.265 a video s kodekem MPEG-2 (HD). Přesnější informace ohledně video vzorků se nachází v tabulce č. 43. Přístrojem EXFO AXS-200-625 byly monitorovány po dobu 2 minut parametry IP bit rate, IP jitter, IP packet loss a průměrné hodnoty těchto parametrů byly zaznamenány do tabulek níže. Jednotlivá měření IPTV byla vykonána pro kombinace optické trasy (0 km EPON + 0 km WDM, 15 km EPON + 25 km WDM) a metalické trasy (po 300 m úsecích do vzdálenosti 2100 m). Pro metalickou trasu se využíval simulátor Spirent DLS 6900 se šumem (s nastavením bez šumu a -120 dBm/Hz, 90 dBm/Hz). Topologie pro měření IPTV je vyobrazená na obrázku č. 175. Navíc u ADSL2+ modemu bylo nutné využít switch, jelikož modem disponoval jen jedním LAN rozhraním.



Obrázek 175: Topologie pro měření IPTV.

Tabulka 43: Video vzorky pro testování IPTV.

Vzorek	Typ souboru	Snímky za sekundu	Rozlišení	Kodek
H.265 HD	MKV	23,976	1920 x 1080	H.265
MPEG-2 HD	MPEG-2 TS	25	1920 x 1080	MPEG-2

11.1.1 Výsledky měření IPTV pro hybridní síť s ADSL2+

Podle naměřených výsledků u kodeku h.265 video nemělo žádný problém při přehrávání do vzdálenosti 2100 m při nastavení bez šumu a se šumem -120 dBm (bez optické trasy). Rozdílné výsledky byly získány při nastavení šumu -90 dBm/Hz. Do vzdálenosti 1200 m byl obraz plynulý a byl bez problému sledovatelný, ale při zvětšení metalické trasy na hodnotu 1500 m vzrostla i ztrátovost paketů na hodnotu kolem 5 %, což se projevilo i na kvalitě videa. Při takovém nastavení se zobrazoval jen jediný snímek za minutu. S rostoucí délkou, respektive při 1800 m (-90 dBm/Hz) nefungoval obraz vůbec. To mimo jiné potvrzuje i parametr bit rate, u kterého došlo k propadu na 929 kbit/s, a výrazná hodnota ztrátovosti (kolem 28 %). Zapojení optické trasy do topologie mělo zásadní vliv na kvalitu videa. Ve všech kombinacích bylo video nesledovatelné. Přehrávač zobrazoval zhruba jen jediný snímek za minutu. Vlivem připojené optické trasy došlo k mírnému nárustu parametru jitter, který v některých případech překračoval 1 ms, ale stále byla splněna doporučená hodnota dle TR-126 (< 50ms).

Video s kodekem MPEG-2 mělo výraznější nároky na parametr bit rate, a proto jej bylo možné přehrát jen při nižších hodnotách metalické trasy a šumu. Při zvyšování metalické trasy až k hodnotě 2100 m bez šumu (bez trasy) u videa nebylo pozorována zhoršení kvality. To však neplatilo při nastavení šumu na hodnotu -120 dBm. Už při vzdálenosti 1500 m se video trhalo a kostičkovalo, jelikož už docházelo ke ztrátovosti (2,56 %) jak je vidět z tabulky. Při zvýšení na 1800 m už dochází k velké ztrátovosti a k úbytku bitové rychlosti (bit rate). Při takovém nastavení se přehrával zhruba 1 snímek za minutu. Zhoršení kvality bylo také zaznamenáno u nastavení šumu -90 dB/Hz, kdy video při 600 m bylo nesledovatelné (1 snímek za minutu). Ztrátovost v tomhle případě byla naměřena na 22,58 %. Při vzdálenosti 300 m kvalita videa byla nepoškozena. Připojením optické trasy došlo k velké degradaci kvality stejně jako u kodeku h.265. Parametr bit rate se snížil už od vzdálenosti 0 m a následně se zvýšil i parametr ztrátovosti, tudíž při žádném nastavení obraz nebyl sledovatelný. Tam kde obraz fungoval bez problému při zapojení bez trasy, tak s trasou se přehrávalo kolem 5 snímků za minutu. Hodnoty parametru jitter byly opět velmi nízké a splňovali hranici 50 ms dle TR-126.

H.265 je kodekem, který potřebuje minimum přenosové kapacity, a proto fungoval bez problému až do vzdálenosti 2100 m. Výjimkou byl jen případ při velké hodnotě šumu (-90 dBm). Kodek MPEG-2 potřeboval pro své bezproblémové fungování větší propustnost sítě, tudíž dosahoval horších výsledků. Velký vliv na výsledky měla optická trasa. Při pátrání, která optická trasa (v EPON nebo v WDM systému) způsobuje degradaci kvality IPTV, bylo zjištěno, že 15 km v systému EPON se splitterem 1 :32 je až příliš. Při nastavení délky 10 km v EPON bylo

možné video přehrát bez problému (testováno na 0 m metalické trasy + 25 km EPON+ 10 Km EPON).

Tabulka 44: Hybridní síť s ADSL2+ - IP Průměrná hodnota bit rate (bez šumu).

ADSL2+ Average IP Bit Rate [kbit/s]				
Spirent DLS 6900 - bez šumu				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	1641	12487	1678	10820
300	2148	12500	1781	10966
600	1887	12485	1259	11038
900	2319	12502	1283	11040
1200	1904	12501	1360	11022
1500	1892	12497	1298	11062
1800	1985	12502	1468	10997
2100	1964	12485	520	11185

Tabulka 45: Hybridní síť s ADSL2+ - IP Průměrná hodnota bit rate (-120 dBm/Hz).

ADSL2+ Average IP Bit Rate [kbit/s]				
Spirent DLS 6900 - 120 dBm/Hz				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	1650	12486	1552	11176
300	2166	12488	1665	11117
600	1756	12463	2037	11285
900	1780	12431	1877	10839
1200	1795	12481	1127	11150
1500	2197	11934	1663	11187
1800	1807	8842	1491	8865
2100	1853	6156	1199	6123

Tabulka 46: Hybridní síť s ADSL2+ - IP Průměrná hodnota bit rate (-90 dBm/Hz).

ADSL2+ Average IP Bit Rate [kbit/s]				
Spirent DLS 6900 - 90 dBm/Hz				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	1759	12494	1580	11201
300	2025	12493	2138	11002
600	1721	9600	1352	9592
900	1961	6173	1236	5941
1200	1718	3527	1682	3533
1500	1716	2156	1413	1712
1800	1224	1260	929	1254
2100	494	494	347	298

Tabulka 47: Hybridní síť s ADSL2+ - IP Ztrátovost paketů (bez šumu).

ADSL2+ IP Packet Loss [%]				
Spirent DLS 6900 - bez šumu				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	0	0	4,58	11,22
300	0	0	3,73	10,49
600	0	0	2,61	10,89
900	0	0	3,45	10,8
1200	0	0	1,63	10,91
1500	0	0	5,08	10,19
1800	0	0	3,7	10,83
2100	0	0	2,08	9,26

Tabulka 48: Hybridní síť s ADSL2+ - IP Ztrátovost paketů (-120 dBm/Hz).

ADSL2+ IP Packet Loss [ms]				
Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	0	0	4,23	9,97
300	0	0	3,92	10,24
600	0	0	3,78	8,73
900	0	0	2,91	11,81
1200	0	0	1,94	9,91
1500	0	2,56	5,26	9
1800	0	28,92	2,92	26,02
2100	0	NA	3,64	39,13

Tabulka 49: Hybridní síť s ADSL2+ - IP Ztrátovost paketů (-90 dBm/Hz).

ADSL2+ IP Packet Loss [ms]				
Spirent DLS 6900 - - 90 dBm/Hz				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	0	0	6.25	8,5
300	0	0	3.06	10,72
600	0	22,58	4.07	18,69
900	0	NA	6.25	39,22
1200	0	NA	4.55	NA
1500	5.13	NA	3.88	NA
1800	28.57	NA	NA	NA
2100	NA	NA	NA	NA

Tabulka 50: Hybridní síť s ADSL2+ - IP Arrival Jitter (bez šumu).

ADSL2+ IP Arrival Jitter [ms]				
Spirent DLS 6900 - bez šumu				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	0,45	0,4	1,25	0,51
300	1,25	0,4	0,48	0,48
600	0,76	0,39	0,64	0,46
900	1,08	0,38	0,82	0,46
1200	0,5	0,34	0,43	0,47
1500	0,44	0,29	1,01	0,39
1800	0,86	0,2	0,86	0,33
2100	0,46	0,1	0,39	0,17

Tabulka 51: Hybridní síť s ADSL2+ - IP Arrival Jitter (-120 dBm/Hz).

ADSL2+ IP Arrival Jitter [ms]				
Spirent DLS 6900 - - 120 dBm/Hz				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	0,47	0,4	0,85	0,47
300	0,46	0,39	0,73	0,47
600	0,38	0,36	0,66	0,44
900	0,43	0,33	0,56	0,43
1200	0,11	0,2	0,61	0,28
1500	0,99	0,09	1,09	0,13
1800	0,22	0,05	0,85	0,08
2100	0,26	NA	0,69	41,65

Tabulka 52: Hybridní síť s ADSL2+ - IP Arrival Jitter (-90 dBm/Hz).

ADSL2+ IP Arrival Jitter [ms]				
Spirent DLS 6900 - - 90 dBm/Hz				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	0,82	0,12	0,89	0,16
300	0,44	0,1	0,68	0,18
600	0,42	0,11	2,15	0,12
900	0,45	NA	3,7	10,61
1200	0,56	NA	0,77	NA
1500	0,14	NA	0,76	NA
1800	12,05	NA	NA	NA
2100	NA	NA	NA	NA

11.1.2 Výsledky měření IPTV pro hybridní síť s VDSL2

Na základě získaných výsledků z přístroje EXFO AEX 200/625 (viz tabulky níže) bylo zjištěno, že u kodeku h.265 nebyla do vzdálenosti 2100 m ovlivněná bitová rychlost (bit rate) ani po připojení optické trasy. Od vzdálenosti 1200 m (šum - 90 dBm/Hz) nebyl modem schopen se připojit do sítě kvůli vysokému útlumu, který vznikl vloženou metalickou trasou a šumem, proto nebylo možno měřit od tohoto nastavení přenosové trasy. V případě parametru jitter taktéž hodnoty nebyly ovlivněny metalickou trasou (do 2100 m) nebo přidaným šumem. Jen v případě ztrátovosti došlo k nárustu při zapojení optické trasy do topologie. Maximálně dosáhla hodnoty 6,29 %. Nicméně hodnoty ztrátovosti byly velmi podobné při všech kombinacích s optickou trasou. Pozitivní je fakt, že s připojenou trasou a bez trasy jsou hodnoty parametru jitter velmi podobné a splňují podmínku dle TR-126 (< 50 ms). Z přehrávání síťového proudu (streamu) obstály všechny testované kombinace bez zapojení optické trasy. Vždy video bylo plynulé a sledovatelné. Výjimku tvoří vzdálenost 900 m se šumem -90 dBm/Hz, kdy obraz byl velice trhaný s určitými deformacemi (viz obrázek č. 176).



Obrázek 176: Konkrétní snímek pro 0 m bez šumu (vlevo) a pro 900 m se šumem -90 dBm/Hz (vpravo) - h.265.

Kodek MPEG-2 byl poměrně náročnější na přenosovou rychlost a už od vzdálenosti 1800 m (bez šumu) ztrátovost dosahovala hodnoty 0,58 %. V tomto případě ztrátovost bylo dost vysoká a video se stalo nesledovatelné (viz obrázek č. 177). Při nastavení šumu na -120 dB/Hz hraniční vzdálenost poklesla. Při 900 m šum neměl vliv na kvalitu videa, ale to neplatilo při vzdálenosti 1200 m. Ztrátovost při této délce dosahovala hodnoty 0,29 %, což mělo za následek, že video se lehce sekalo a kostičkovalo. Zvětšením hodnoty šumu na 90 dBm/Hz mělo opět výrazný vliv na maximální překlenutelnou délku, kdy je možné video sledovat bez problému. Již při 300 m metalického vedení byla zaznamenána přístrojem hodnota ztrátovosti 0,84 %. Tato hodnota ztrátovosti se projevovala vysokým kostičkováním a sekáním obrazu. Vždy při nenulové ztrátovosti lze sledovat i pokles parametru IP bit rate. S přidanou trasou v systémech EPON a WDM se video vždy v jakékoli kombinaci vyznačovalo ztrátovostí větší než 6 %, tudíž video nebylo sledovatelné. Trasa na parametr jitter měla velmi minimální vliv. Jen v některých případech jitter mírně vzrostl, ale stále se hodnoty pohybovaly kolem 1 ms a splňovaly doporučenou hodnotu dle TR-126.



Obrázek 177: Konkrétní snímek pro 0 m bez šumu (vlevo) a pro 1800 m bez šumu (vpravo) - MPEG-2.

Tabulka 53: Hybridní síť s VDSL2 - IP Průměrná hodnota bit rate (bez šumu).

VDSL2 Average IP Bit Rate [kbit/s]				
Spirent DLS 6900 - bez šumu				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	2219	12497	1497	11250
300	1340	12496	1851	11312
600	2054	12506	1589	11111
900	1624	12475	1574	11519
1200	1753	12548	1964	11349
1500	2079	12485	1334	11475
1800	1312	9637	1663	9635
2100	1758	7146	1514	6319

Jak již bylo řečeno, s připojenou optickou trasou došlo k nárustu ztrátovosti, která měla markantní vliv na kvalitu přehrávaného síťového proudu. Video bylo nesledovatelné a vždy docházelo ke ztrátovosti. Stejně jako u pokusu hybridní sítě s ADSL 2+ , tak i u VDSL2 bylo zjištěno, že optická trasa 15km u EPON způsobuje degradaci kvality IPTV se splitterem 1 : 32. Při nastavení délky 10 km v EPON bylo možné video přehrát bez problému (testováno na 0 m metalické trasy + 25 km EPON+ 10 Km EPON).

Tabulka 54: Hybridní síť s VDSL2 - IP Průměrná hodnota bit rate (-120 dBm/Hz).

VDSL2 Average IP Bit Rate [kbit/s]				
Spirent DLS 6900 - 120 dBm/Hz				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	1781	12504	2389	11528
300	2166	12492	1786	11396
600	1892	12495	1807	11576
900	1816	12495	1995	11626
1200	1760	11294	1836	11647
1500	1773	6957	2157	6960
1800	2335	4532	1649	3701
2100	1768	2744	1638	2444

Tabulka 55: Hybridní síť s VDSL2 - IP Průměrná hodnota bit rate (-90 dBm/Hz).

VDSL2 Average IP Bit Rate [kbit/s]				
Spirent DLS 6900 - 90 dBm/Hz				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	1805	12468	1425	11627
300	1737	7785	1719	7466
600	1305	2807	1707	2809
900	1404	702	1722	702
1200	-	-	-	-
1500	-	-	-	-
1800	-	-	-	-
2100	-	-	-	-

Tabulka 56: Hybridní síť s VDSL2 - IP Ztrátovost paketů (bez šumu).

VDSL2 IP Packet Loss [%]				
Spirent DLS 6900 - bez šumu				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	0	0	4,38	9,26
300	0	0	2,37	7,51
600	0	0	5,52	7,79
900	0	0	6,29	6,74
1200	0	0	1,68	8,39
1500	0	0	0,82	7,16
1800	0	0,57	2,63	7,27
2100	0	0,92	5,8	9,53

Tabulka 57: Hybridní síť s VDSL2 - IP Ztrátovost paketů (-120 dBm/Hz).

VDSL2 IP Packet Loss [ms]				
Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	0	0	3,65	6,41
300	0	0	3,09	8,04
600	0	0	3,03	6,33
900	0	0	3,3	6,59
1200	0	0,29	5,36	6,02
1500	0	1,1	2,54	8,82
1800	0	1,45	5,3	9,17
2100	0	1,59	4,03	9,56

Tabulka 58: Hybridní síť s VDSL2 - IP Ztrátovost paketů (-90 dBm/Hz).

VDSL2 IP Packet Loss [ms]				
Spirent DLS 6900 - - 90 dBm/Hz				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	0	0	4,62	6,02
300	0	0,84	3,82	7,04
600	0	1,95	2,58	11,72
900	0	3,13	3,82	6,25
1200	-	-	-	-
1500	-	-	-	-
1800	-	-	-	-
2100	-	-	-	-

Tabulka 59: Hybridní síť s VDSL2 - IP Arrival Jitter (bez šumu).

VDSL2 IP Arrival Jitter [ms]				
Spirent DLS 6900 - bez šumu				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	0,98	0,13	0,71	0,79
300	0,29	0,74	0,42	1,23
600	0,62	0,68	0,79	1,13
900	0,34	0,55	1,07	0,63
1200	0,32	0,4	0,54	0,65
1500	0,34	0,2	0,42	0,31
1800	1,93	0,11	0,76	0,11
2100	0,68	0,09	0,66	0,17

Tabulka 60: Hybridní síť s VDSL2 - IP Arrival Jitter (-120 dBm/Hz).

VDSL2 IP Arrival Jitter [ms]				
Spirent DLS 6900 - - 120 dBm/Hz				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	0,46	0,74	0,59	1,23
300	0,31	0,77	1,22	1,16
600	0,84	0,63	0,48	0,28
900	0,46	0,25	0,63	0,98
1200	0,35	0,05	1,04	0,23
1500	0,37	0,12	0,93	0,12
1800	1,2	0,19	0,88	0,07
2100	0,48	0,35	0,86	0,33

Tabulka 61: Hybridní síť s VDSL2 - IP Arrival Jitter (-90 dBm/Hz).

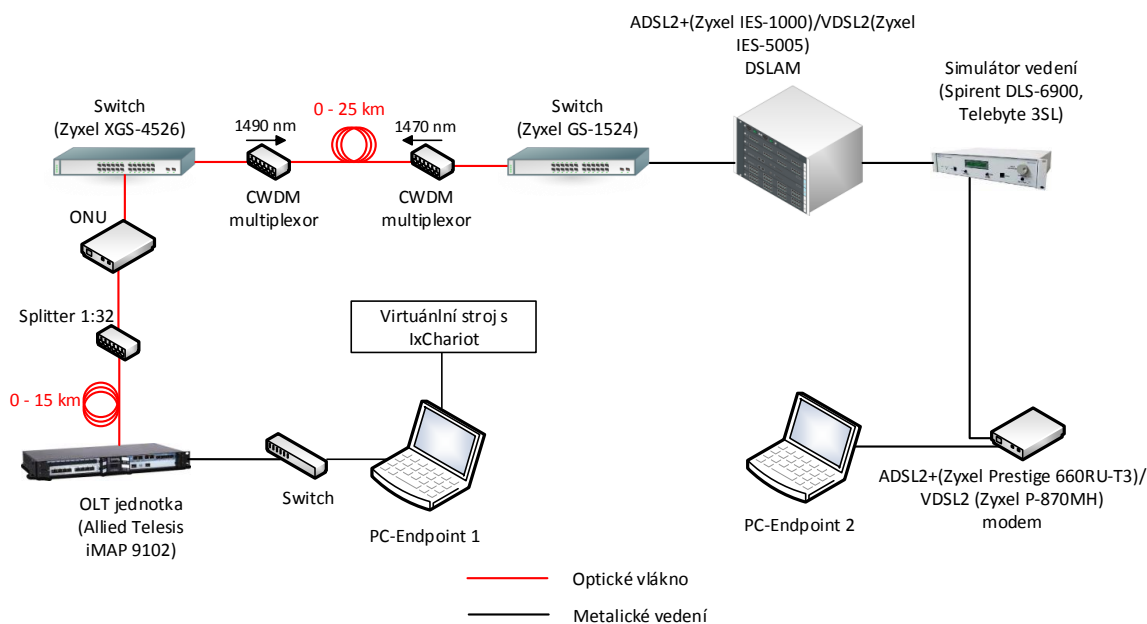
VDSL2 IP Arrival Jitter [ms]				
Spirent DLS 6900 - - 90 dBm/Hz				
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	H.265	MPEG-2	H.265	MPEG-2
0	0,89	0,42	0,89	0,49
300	0,41	0,14	0,59	0,09
600	0,86	0,16	0,98	0,15
900	0,32	0,18	0,13	0,56
1200	-	-	-	
1500	-	-	-	
1800	-	-	-	
2100	-	-	-	

11.2 VoIP

K ohodnocení kvality hovoru byl využit program IxChariot, který byl nainstalovaný na virtuálním stroji přes VMware Workstation Pro. Pro testování pomocí programu IxChariot musely být nastaveny dva koncové body (endpoints), mezi kterými probíhal hovor. Na PC, který byl zvolen jako endpoint, proto musela být nainstalována aplikace IxChariot/Hawkeye Platform Endpoints, která je volně dostupná na internetu. Jeden z endpointů (PC1) byl na straně serveru a druhý endpoint (PC2) byl připojen na konci sítě k modemu. Pro VoIP hovory byly využity 3 typy kodeků. Každý typ využíval rozdílnou šířku pásma. Nastavení kodeku je v tabulce č.62. Topologie pro měření VoIP je zobrazena na obrázku 178.

Tabulka 62: Zvolené kodeky pro testování VoIP.

Kodek	Šířka pásma [kbit/s]
G.711 μ law	64
G.723.1 ACELP	5,3
G.729	8



Obrázek 178: Topologie při měření kvality hovorů.

Tabulka 63: MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - bez šumu + bez optické trasy .

Spirent DLS 6900 - bez šumu + bez optické trasy						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,37	91,32	3,64	70,91	4	79,45
300	4,37	92,11	3,63	70,79	4,02	79,91
600	4,24	87,77	3,64	70,91	4	79,55
900	4,34	90,47	3,64	70,84	4,02	79,92
1200	4,37	91,31	3,64	70,95	4,02	80,02
1500	4,37	91,3	3,64	70,93	4,02	79,99
1800	4,37	91,2	3,63	70,77	4,02	79,88
2100	4,37	91,15	3,63	70,77	4,02	79,75

Tabulka 64: MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - bez šumu + optická trasa .

Spirent DLS 6900 - bez šumu + optická trasa						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,36	90,76	3,62	70,54	4,01	79,79
300	4,33	89,88	3,61	70,44	3,91	79,73
600	4,23	89,86	3,62	70,65	4,02	79,78
900	4,33	90,24	3,62	70,61	4,02	79,84
1200	4,32	89,85	3,63	70,72	4,01	79,62
1500	4,34	90,26	3,62	70,58	4,01	79,61
1800	4,35	90,63	3,61	70,26	4,01	79,54
2100	4,33	90,19	3,61	70,37	4,01	79,61

11.2.1 Výsledky měření nástrojem IxChariot pro síť EPON/CWDM/ADSL2+

Jednotlivá měření byla vykonána pro kombinace optické trasy (0 km EPON + 0 km WDM, 15 km EPON + 25 km WDM) a metalické trasy (po 300 m do 2100 m) se šumem (Spirent DLS 6900 - od -90 až do -120 dBm/Hz) a bez šumu (modul 458-LM-HDE, Spirent DLS 6900-bez šumu).

Tabulka 65: MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz + bez optické trasy.

Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz + bez optické trasy						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,37	91,34	3,63	70,72	4	79,57
300	4,37	91,21	3,64	70,84	4,02	79,93
600	4,37	91,32	3,64	70,92	3,97	78,91
900	4,37	90,33	3,64	70,93	4,02	80,01
1200	4,37	91,17	3,63	70,78	4,01	79,79
1500	4,37	91,15	3,63	70,74	4,02	79,86
1800	4,37	91,11	3,63	70,72	4,02	79,78
2100	4,37	91,14	3,62	70,63	4,02	79,84

Tabulka 66: MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz + s optickou trasou.

Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz + s optickou trasou						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,36	90,76	3,62	70,54	4,02	79,79
300	4,33	89,88	3,61	70,44	3,91	79,73
600	4,33	89,86	3,62	70,65	4,02	79,78
900	4,33	90,24	3,62	70,61	4,02	79,84
1200	4,32	89,85	3,63	70,72	4,01	79,62
1500	4,34	90,26	3,62	70,58	4,01	79,61
1800	4,35	90,63	3,61	70,26	4,01	79,54
2100	4,33	90,19	3,61	70,37	4,01	79,61

Tabulka 67: MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -110 dBm/Hz + bez optické trasy.

Spirent DLS 6900 - -110 dBm/Hz + bez optické trasy						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,37	91,2	3,63	70,83	4,02	79,77
300	4,29	88,91	3,64	70,85	4,02	79,91
600	4,37	91,31	3,64	70,9	4,02	80
900	4,27	88,46	3,63	70,67	4,02	79,88
1200	4,37	91,14	3,59	69,93	3,96	78,58
1500	4,35	90,65	3,62	70,42	4,02	79,79
1800	4,37	91,13	3,63	70,71	4,02	79,86
2100	4,37	91,11	3,61	70,37	4,02	79,81

Tabulka 68: MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -110 dBm/Hz + s optickou trasou.

Spirent DLS 6900 - -110 dBm/Hz + s optickou trasou						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,16	85,41	3,55	69,02	4,01	79,62
300	4,18	86,46	3,62	70,43	3,99	79,25
600	4,3	89,43	3,63	70,77	4,01	79,70
900	4,28	88,74	3,61	70,4	4,02	79,68
1200	4,37	91,11	3,62	70,6	4,02	79,77
1500	4,21	87,19	3,58	69,69	4,02	79,73
1800	4,33	89,87	3,63	70,71	3,98	79,93
2100	4,33	90,24	3,6	69,99	3,99	79,17

Tabulka 69: MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -100 dBm/Hz + bez optické trasy

Spirent DLS 6900 - -100 dBm/Hz + bez optické trasy						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,37	91,21	3,63	70,8	3,99	79,25
300	4,37	91,15	3,63	70,67	4,02	79,82
600	4,37	91,2	3,63	70,78	4,02	79,79
900	4,37	91,12	3,63	70,74	4,02	79,81
1200	4,33	90,22	3,63	70,72	4,01	79,71
1500	4,35	90,71	3,59	69,79	4,02	79,76
1800	4,33	90,18	3,6	70,08	4	79,48
2100	4,35	90,64	3,62	70,53	4,01	79,57

Tabulka 70: MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -100 dBm/Hz + s optickou trasou

Spirent DLS 6900 - -100 dBm/Hz + s optickou trasou						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,36	90,76	3,62	70,54	4,02	79,79
300	4,33	89,88	3,61	70,44	3,91	79,73
600	4,33	89,86	3,62	70,65	4,02	79,78
900	4,33	90,24	3,62	70,61	4,02	79,84
1200	4,32	89,85	3,63	69,72	4,01	79,62
1500	4,34	90,26	3,62	70,58	4,01	79,61
1800	4,35	90,63	3,61	70,26	4,01	79,54
2100	4,33	90,19	3,61	70,37	4,01	79,61

Tabulka 71: MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -90 dBm/Hz + bez optické trasy .

Spirent DLS 6900 - -90 dBm/Hz + bez optické trasy						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,37	91,13	3,63	70,73	4,02	79,82
300	4,36	91,1	3,62	70,5	4,02	79,82
600	4,36	91,09	3,63	70,63	4,01	79,72
900	4,36	91,09	3,63	70,69	4,01	79,68
1200	4,36	91,06	3,62	69,43	4,01	79,57
1500	4,35	91,68	3,63	70,71	4,02	79,81
1800	4,25	88,42	3,61	70,38	4,02	79,78
2100	4,33	90,27	3,62	70,59	4,02	79,77

Tabulka 72: MOS a R-faktor - ADSL2+ - Spirent DLS 6900 - -90 dBm/Hz + s optickou trasou.

Spirent DLS 6900 - -90 dBm/Hz + s optickou trasou						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,29	89,97	3,62	70,59	4,02	79,72
300	4,34	90,29	3,61	70,39	4,01	79,46
600	4,33	90,19	3,62	70,51	4,01	79,64
900	4,31	89,57	3,43	66,64	4,02	79,71
1200	4,36	91,06	3,62	70,52	4,01	79,77
1500	4,32	89,6	3,63	70,69	3,92	79,73
1800	4,32	89,79	3,6	70,18	4,02	79,82
2100	4,29	88,86	3,61	70,17	4,01	79,66

Tabulka 73: MOS a R-faktor - ADSL2+ - Telebyte 458-3SL - modul 458-LM-HDE + bez optické trasy.

Telebyte 3SL - modul 458-LM-HDE + bez optické trasy						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,37	91,31	3,64	70,94	4,02	79,99
300	4,37	91,32	3,64	70,94	4,02	80,01
600	4,37	91,32	3,64	70,94	4,02	80,02
900	4,37	91,3	3,64	70,93	4,01	79,67
1200	4,36	90,76	3,63	70,68	4,02	79,89
1500	4,37	91,19	3,63	70,78	4,02	79,82
1800	4,37	91,16	3,62	70,65	4,02	79,87
2100	4,37	91,13	3,63	70,75	4,02	79,84

Tabulka 74: MOS a R-faktor - ADSL2+ - Telebyte 458-3SL - modul 458-LM-HDE + s optickou trasou.

Telebyte 458-3SL - modul 458-LM-HDE + s optickou trasou						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,33	90,4	3,64	70,68	4,01	79,87
300	4,31	89,61	3,62	70,57	3,98	79,05
600	3,88	78,42	3,55	69,08	3,98	78,95
900	4,18	86,01	3,59	69,86	4,02	80
1200	4,37	91,22	3,63	70,77	4,01	79,67
1500	4,72	75,57	3,55	69,19	4,02	79,82
1800	4,23	87,08	3,6	70,19	4,01	79,51
2100	3,86	78,58	3,6	70,09	4,01	79,69

Tabulka 75: MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - bez šumu + bez optické trasy .

Spirent DLS 6900 - bez šumu + bez optické trasy						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,37	91,29	3,57	69,34	4,02	80,02
300	4,28	88,85	3,57	69,54	3,98	79,1
600	4,36	90,8	3,42	66,54	4,02	79,94
900	4,36	90,78	3,64	70,87	4,01	79,59
1200	4,37	91,18	3,63	70,76	4,02	79,88
1500	4,34	90,25	3,63	70,75	4,01	79,74
1800	4,32	90,05	3,61	70,35	4,01	79,74
2100	4,36	90,77	3,63	70,75	4,02	79,87

Tabulka 76: MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - bez šumu + optická trasa .

Spirent DLS 6900 - bez šumu + optická trasa						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	3,59	72,28	3,62	70,41	4,01	79,77
300	4,24	87,91	3,64	70,89	4,01	79,77
600	4,36	90,82	3,63	70,61	4,02	79,92
900	4,36	90,81	3,64	70,82	4,01	79,69
1200	4,33	89,87	3,63	70,76	4,01	79,71
1500	4,36	90,73	3,63	70,76	4,02	79,82
1800	4,37	91,16	3,62	70,64	3,98	78,97
2100	4,27	88,3	3,62	70,65	4,02	79,77

11.2.2 Výsledky měření nástrojem IxChariot pro síť EPON/CWDM/VDSL2

Jednotlivá měření byla vykonána pro kombinace optické trasy (0 km EPON + 0 km WDM, 15 km EPON + 25 km WDM) a metalické trasy (po 300 m do 2100 m) se šumem (Spirent DLS 6900 - od -90 až do -120 dBm/Hz) a bez šumu (modul 458-LM-HDE, Spirent DLS 6900-bez šumu).

Tabulka 77: MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz + bez optické trasy.

Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz + bez optické trasy						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,33	90,03	3,64	70,92	4,02	79,90
300	4,32	90,27	3,64	70,91	4,02	80,03
600	4,34	90,48	3,63	70,81	4,01	79,8
900	4,37	91,26	3,64	70,85	4,01	79,8
1200	4,36	90,72	3,63	70,77	4,02	79,87
1500	4,29	88,96	3,63	70,80	4,02	79,87
1800	4,37	91,16	3,63	70,74	4,02	79,84
2100	4,37	91,16	3,63	70,77	4,02	79,88

Tabulka 78: MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz + s optickou trasou.

Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz + s optickou trasou						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,33	90,02	3,63	70,8	4,01	79,84
300	4,36	89,87	3,63	70,78	4,01	79,83
600	4,34	89,35	3,63	70,72	4,02	79,91
900	4,36	90,81	3,61	70,29	4,01	79,78
1200	4,33	89,88	3,62	70,53	4,02	79,77
1500	4,31	89,56	3,62	70,5	4,02	79,77
1800	4,35	90,7	3,62	70,49	4,02	79,77
2100	4,34	90,29	3,62	70,63	4,02	79,78

Tabulka 79: MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -110 dBm/Hz + bez optické trasy.

Spirent DLS 6900 - -110 dBm/Hz + bez optické trasy						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,37	91,29	3,64	70,93	4,02	79,92
300	4,36	90,85	3,53	68,75	4	79,6
600	4,24	88,31	3,64	70,85	4,02	79,92
900	4,37	91,1	3,63	70,77	4,02	79,86
1200	4,37	91,14	3,63	70,76	4,02	78,86
1500	4,36	90,72	3,63	70,73	4,02	79,84
1800	4,35	90,71	3,63	70,77	4,02	79,84
2100	4,36	90,95	3,63	70,60	4,01	79,67

Tabulka 80: MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -110 dBm/Hz + s optickou trasou.

Spirent DLS 6900 - -110 dBm/Hz + s optickou trasou						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,36	90,87	3,63	70,69	4,01	79,76
300	4,26	88,22	3,62	70,53	4,01	79,79
600	4,33	89,96	3,6	70,12	4,02	79,85
900	4,33	89,87	3,6	70,18	4,01	79,53
1200	4,3	89,14	3,63	70,73	4,01	79,69
1500	4,31	89,42	3,63	70,73	4,02	79,83
1800	4,31	89,45	3,63	70,73	4,02	79,82
2100	4,3	89,27	3,6	70,15	4,01	79,6

Tabulka 81: MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -100 dBm/Hz + bez optické trasy .

Spirent DLS 6900 - -100 dBm/Hz + bez optické trasy						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,37	91,24	3,64	70,89	4,02	80
300	4,37	91,25	3,64	70,84	4,01	79,79
600	4,37	91,14	3,62	70,61	4,02	79,85
900	4,37	91,15	3,63	70,76	4,02	79,84
1200	4,35	90,71	3,63	70,72	4,02	79,83
1500	4,35	90,54	3,62	70,52	4,01	79,73
1800	4,32	90	3,63	70,59	4,01	79,75
2100	-	-	-	-	-	-

Tabulka 82: MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -100 dBm/Hz + s optickou trasou .

Spirent DLS 6900 - -100 dBm/Hz + s optickou trasou						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,26	88,11	3,58	69,79	3,88	76,89
300	4,18	86,55	3,64	70,82	4,02	79,83
600	4,37	91,15	3,62	70,64	4,01	79,71
900	4,31	89,57	3,63	70,72	4,01	79,68
1200	4,32	89,84	3,62	70,62	4,01	79,68
1500	4,35	90,52	3,62	70,58	4,01	79,63
1800	4,35	90,52	3,62	70,44	4,01	79,65
2100	-	-	-	-	-	-

Tabulka 83: MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -90 dBm/Hz + bez optické trasy .

Spirent DLS 6900 - -90 dBm/Hz + bez optické trasy						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,37	91,24	3,63	70,75	4,02	79,96
300	4,22	87,4	3,64	70,84	4,02	79,89
600	4,36	91,08	3,63	70,66	4,02	79,76
900	4,36	91,01	3,62	70,53	4,01	79,7
1200	x	x	x	x	x	x
1500	x	x	x	x	x	x
1800	x	x	x	x	x	x
2100	x	x	x	x	x	x

Tabulka 84: MOS a R-faktor - VDSL2 - Spirent DLS 6900 - -90 dBm/Hz + s optickou trasou.

Spirent DLS 6900 - -90 dBm/Hz + s optickou trasou						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,34	90,37	3,63	70,71	4,02	79,93
300	4,34	90,34	3,62	70,57	4,02	79,84
600	4,35	90,66	3,63	70,66	4,02	79,78
900	4,32	89,68	3,62	70,54	4,02	79,64
1200	x	x	x	x	x	x
1500	x	x	x	x	x	x
1800	x	x	x	x	x	x
2100	x	x	x	x	x	x

Tabulka 85: MOS a R-faktor - VDSL2 - Telebyte 458-3SL - modul 458-LM-HDE + bez optické trasy.

Telebyte 458-3SL - modul 458-LM-HDE + bez optické trasy						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,37	91,26	3,61	70,29	4,02	79,99
300	4,37	91,3	3,64	70,94	4,03	80,02
600	4,37	91,28	3,64	70,9	4,02	80,01
900	4,33	91,12	3,64	70,80	4,02	80
1200	4,37	90,14	3,63	70,76	4,01	79,73
1500	4,36	91,75	3,63	70,78	4,01	79,58
1800	4,37	91,18	3,63	70,77	4,02	79,84
2100	4,36	91,76	3,63	70,78	4,02	79,88

Tabulka 86: MOS a R-faktor - VDSL2 - Telebyte 458-3SL - modul 458-LM-HDE + s optickou trasou.

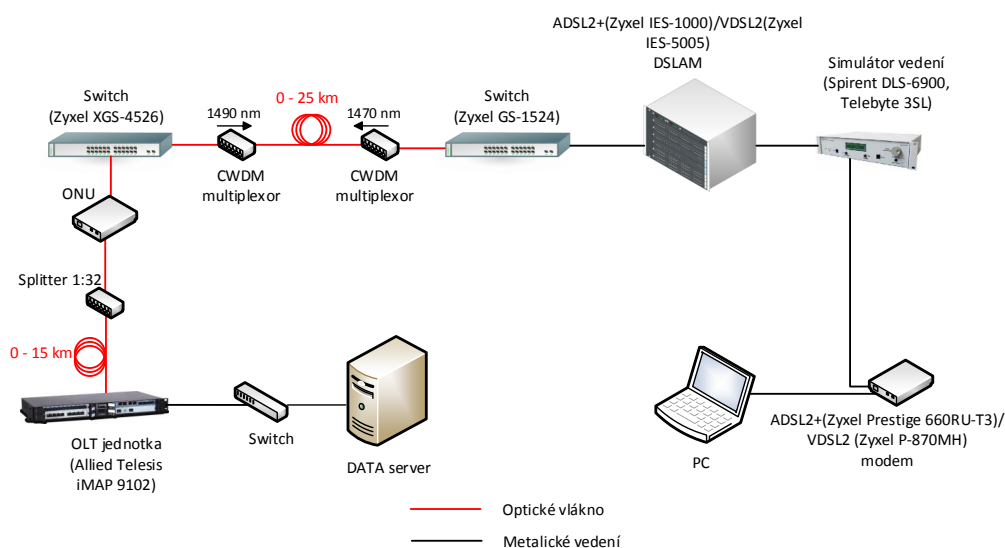
Telebyte 458-3SL - modul 458-LM-HDE + s optickou trasou						
Typ kodeku	G.711		G.723-ACELP		G.729	
metalická trasa [m]	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0	4,14	85,41	3,62	70,46	4,01	79,79
300	4,36	90,86	3,64	70,92	4,02	79,98
600	4,34	90,45	3,61	70,24	4,01	79,78
900	4,36	90,87	3,63	70,81	4,02	79,93
1200	4,3	89,18	3,63	70,67	4,02	79,92
1500	4,33	89,87	3,63	70,74	3,99	79,05
1800	4,37	91,15	3,63	70,75	4,01	79,54
2100	3,33	89,89	3,58	69,77	3,99	79,25

11.2.3 Vyhodnocení výsledků měření kvality VoIP.

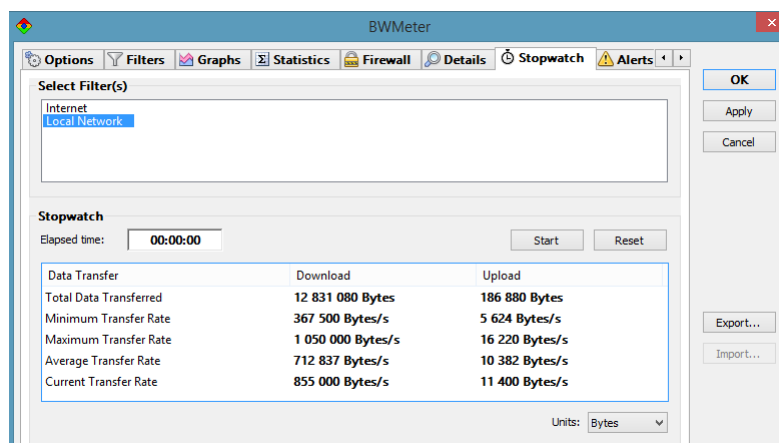
Na základě změřených výsledků na hybridní síti s ADSL2+ a VDSL2, které jsou uvedeny v tabulkách výše, lze tvrdit, že do vzdálenosti metalického vedení 2,1 km nebyl hovor z pohledu kvality MOS a R-faktoru ovlivněn šumem nebo metalickou vzdáleností. U technologie VDSL2 šum jen nedovoloval se modemu připojit při určité vzdálenosti, a proto hovor v těchto situacích nemohl být uskutečněn. Zejména tomu bylo při nastaveném šumu -90 dBm/Hz od vzdálenosti 1,2 km a také při hodnotě šumu -100 dBm/Hz při vzdálenosti 2,1 km. Po připojení optické trasy také nedošlo ke změně kvality hovorů. Hodnota stupnice MOS se u kodeku G.711 pohybovala lehce nad hodnotou 4,3. Na druhé straně R-faktor dosahoval hodnot 91, což značí *Velmi spokojeni* na základě stupnice. Kodek G.723.1 se vyznačoval nejmenší potřebnou šířkou pásma, a také proto disponoval nejmenší hodnotou MOS (kolem 3,6) oproti všem testovaným kodekům. S poklesem MOS samozřejmě klesla i hodnota R-faktoru a to na hodnotu nejčastěji kolem 70,5. V takovém případě mohou být *Někteří uživatelé nespokojeni*. Posledním testovaným kodekem byl G.729, který tvořil průměr mezi oběma dalšími testovanými kodeky. Hodnoty MOS se pohybovaly kolem 4 a R-faktor byl zaznamenán nad hodnotou 79. Právě tato hodnota R-faktoru tvoří hranici mezi *Velmi spokojeni* a *Někteří uživatelé nespokojeni*. Naměřené hodnoty jsou očekávané, jelikož se jedná o typické hodnoty kodeků. Z výsledků z Ethersamu (ITU-T Y.1564) lze si všimnout, že při větších hodnotách šumu by některé hovory neobstály z hlediska propustnosti do vzdálenosti 2,1 km, ale je nutné si uvědomit, že ITU-T Y.1564 testuje všechny tři služby najednou. V tomto testu pomocí aplikace IxChariot byly jednotlivé testy hovorů prováděny samostatně (po jednom hovoru) a na síti v průběhu testu se nevyžívala další jiná služba.

11.3 Data

Pro měření datové služby byl vytvořen server DATA, který fungoval jako virtuální stroj na serveru ABACUS stejně jako IPTV server. Po zadání adresy serveru 10.1.4.10 do internetového prohlížeče bylo možné si zobrazit webovou stránku. Z této webové stránky bylo možné stahovat data nebo i nahrávat jednotlivá data na server. Měření přenosové rychlosti stahování a nahrávání probíhalo pomocí softwaru BWMeter. Topologie pro měření je zobrazena na obrázku č. 179 a je prakticky stejná jako u měření IPTV s tím rozdílem, že na serveru Abacus byl zapnut virtuální stroj DATA.



Obrázek 179: Topologie při měření přenosové rychlosti u datové služby.



Obrázek 180: Ukázka měření v programu BWMeter.

11.3.1 Výsledky pro Službu Data - EPON/WDM/ADSL2+

Jednotlivá měření byla vykonána pro kombinace optické trasy (0 km EPON + 0 km WDM, 15 km EPON + 25 km WDM) a metalické trasy (po 300 m do 2100 m) se šumem (Spirent DLS 6900 - od -90 až do -120 dBm/Hz) a bez šumu (modul 458-LM-HDE, Spirent DLS 6900-bez šumu). Měření proběhlo na portu č. 10 s přenosovou rychlostí 26 Mbit/s v sestupném směru a 1,2 Mbit/s ve vzestupném směru (změřeno pomocí VeEx VePAL BX100V).

Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulkách níže. Maximální hodnota přenosové rychlosti ve směru sestupném (Downstream - DS) byla naměřena 21,841 Mbit/s při modulu 458-LM-HDE, který nepřidával šum do trasy. S přibývajícím šumem a metalickou vzdáleností opět klesala přenosová rychlost. Rozdíl mezi DS přenosovou rychlostí bez šumu a se šumem -90 dBm/Hz je ve většině případu až 10 Mbit/s. Připojení optické trasy mělo výrazný negativní vliv přenosové rychlosti v DS. V opačném směru (Upstream - US) nebyl zaznamenán žádný vliv.

Tabulka 87: Naměřené přenosové rychlosti pro síť s ADSL2+ s optickou trasou a bez optické trasy (bez šumu).

ADSL2+	Spirent DLS 6900 - bez šumu			
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]
0	20,242	1,253	9,921	1,246
300	21,444	1,215	10,485	1,246
600	19,441	1,27	9,447	1,286
900	20,48	1,198	7,986	1,187
1200	19,27	1,223	7,492	1,236
1500	17,63	1,219	11,44	1,219
1800	15,441	1,101	6,422	1,094
2100	12,723	0,995	7,41	0,96

Tabulka 88: Naměřené přenosové rychlosti pro síť s ADSL2+ s optickou trasou a bez optické trasy (-120 dBm/Hz).

ADSL2+	Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz			
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]
0	19,842	1,233	12,100	1,250
300	21,2	1,223	12,321	1,230
600	20,163	1,237	10,486	1,247
900	17,923	1,218	7,744	1,201
1200	13,361	1,182	6,285	1,159
1500	11,768	1,134	5,921	1,189
1800	8,86	1,079	5,847	1,031
2100	6,163	0,976	5,122	0,983

Tabulka 89: Naměřené přenosové rychlosti pro síť s ADSL2+ s optickou trasou a bez optické trasy (-110 dBm/Hz).

ADSL2+	Spirent DLS 6900 - -110 dBm/Hz			
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]
0	21,042	1,222	7,381	1,211
300	19,764	1,225	7,745	1,216
600	17,846	1,240	6,728	1,226
900	15,121	1,144	6,431	1,182
1200	10,800	1,084	6,526	1,119
1500	7,925	1,071	3,74	1,094
1800	5,526	0,976	4,920	0,964
2100	3,761	0,904	3,600	0,905

Tabulka 90: Naměřené přenosové rychlosti pro síť s ADSL2+ s optickou trasou a bez optické trasy (-100 dBm/Hz).

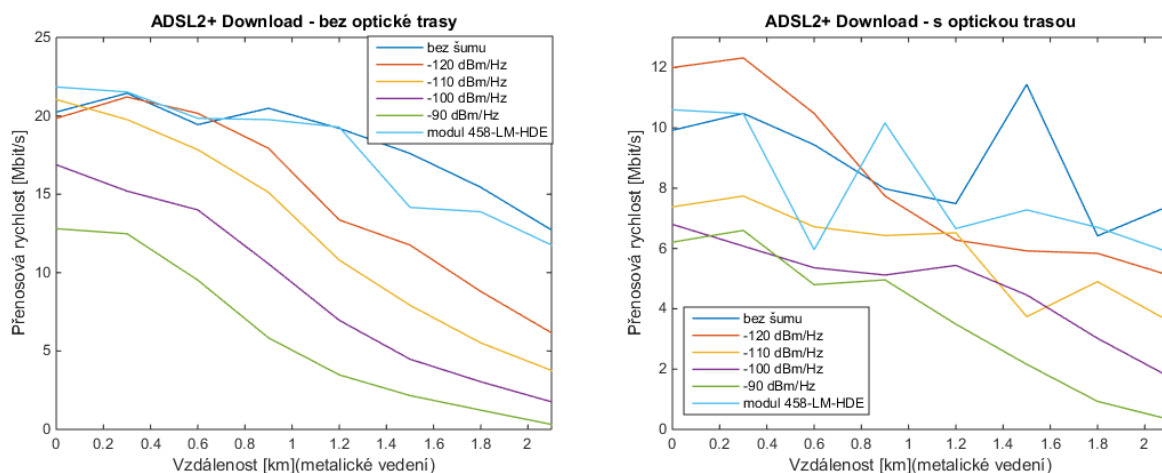
ADSL2+	Spirent DLS 6900 - -100 dBm/Hz			
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]
0	16,884	1,116	6,804	1,120
300	15,201	1,134	6,081	1,132
600	14,027	1,111	5,362	1,101
900	10,567	1,025	5,128	1,055
1200	6,963	1,009	5,447	0,949
1500	4,481	1,895	4,460	0,892
1800	3,046	0,783	3,021	0,785
2100	1,766	0,668	1,763	0,675

Tabulka 91: Naměřené přenosové rychlosti pro síť s ADSL2+ s optickou trasou a bez optické trasy (-90 dBm/Hz).

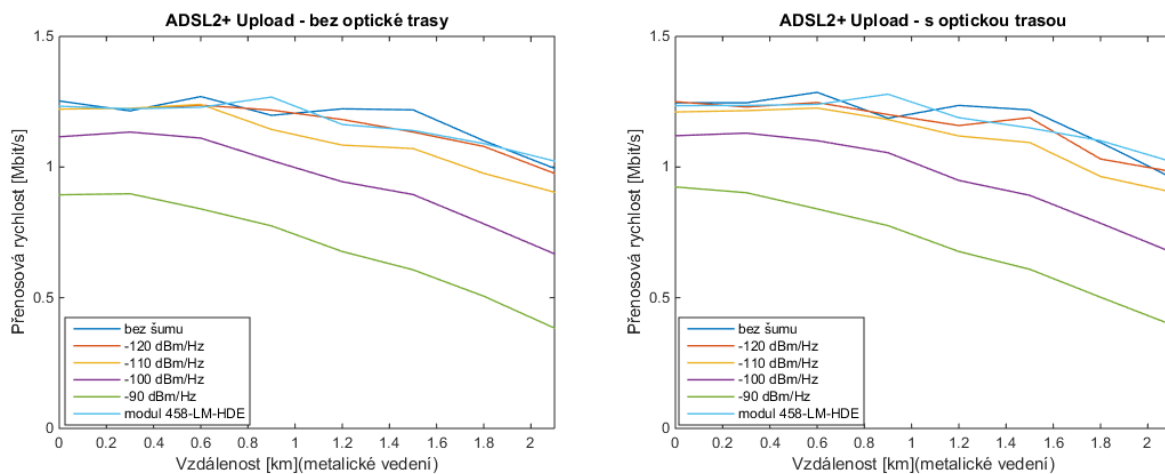
ADSL2+	Spirent DLS 6900 - -90 dBm/Hz			
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]
0	12,807	0,894	6,212	0,924
300	12,486	0,898	6,607	0,902
600	9,523	0,840	4,802	0,840
900	5,840	0,775	4,969	0,776
1200	3,488	0,677	3,493	0,677
1500	2,165	0,607	2,160	0,609
1800	1,231	0,506	0,936	0,502
2100	0,322	0,384	0,347	0,397

Tabulka 92: Naměřené přenosové rychlosti pro síť s ADSL2+ s optickou trasou a bez optické trasy (modul 458-LM-HDE).

ADSL2+	Telebyte 458-3SL - modul 458-LM-HDE			
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]
0	21,841	1,233	10,604	1,235
300	21,526	1,223	10,471	1,236
600	19,843	1,229	5,963	1,240
900	19,768	1,268	10,162	1,279
1200	19,287	1,163	6,663	1,189
1500	14,169	1,140	7,281	1,150
1800	13,885	1,090	6,704	1,101
2100	11,764	1,023	5,881	1,021



Obrázek 181: DATA - ADSL2+ - přenosová rychlost stahování - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 182: DATA - ADSL2+ - přenosová rychlost nahrávání - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

Tabulka 93: Naměřené přenosové rychlosti pro síť s VDSL2 s optickou trasou a bez optické trasy (bez šumu).

VDSL2	Spirent DLS 6900 - bez šumu			
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]
0	58,241	0,371	11,128	0,368
300	55,920	0,444	11,041	0,449
600	40,484	0,347	8,563	0,401
900	24,729	0,386	8,247	0,527
1200	19,363	0,684	5,526	0,684
1500	17,687	0,684	5,843	0,685
1800	9,601	0,714	6,568	0,709
2100	6,328	0,684	4,99	0,684

11.3.2 Výsledky pro Službu Data - EPON/WDM/VDSL2

Jednotlivá měření byla vykonána pro kombinace optické trasy (0 km EPON + 0 km WDM, 15 km EPON + 25 km WDM) a metalické trasy (po 300 m do 2100 m) se šumem (Spirent DLS 6900 - od -90 až do -120 dBm/Hz) a bez šumu (modul 458-LM-HDE, Spirent DLS 6900-bez šumu). Měření proběhlo na portu č. 12 s přenosovou rychlostí 63,968 Mbit/s v sestupném směru a 35,968 Mbit/s ve vzestupném směru (změřeno modemem).

Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulkách níže. Maximální hodnota přenosové rychlosti ve směru sestupném (Downstream - DS) byla naměřena 58,243 Mbit/s při modulu 458-LM-HDE, který nepřidával šum do trasy. Tato hodnota je velmi podobná jako u simulátoru Spirent DLS 6900 - bez šumu. Na rozdíl od ADSL modem nebyl schopen se připojit při určité hodnotě šumu a metalické vzdálenosti, respektive při -100 dBm/Hz (2100 m) a -90 dBm/Hz (od 1200 m). Šum měl výrazný vliv na hodnoty přenosové rychlosti. Například hodnota 58,24 Mbit/s změřená bez šumu v downstreamu (DS), poklesla přidáním šumu -90 dBm/Hz na 15,84 při 0 m metalické trasy. Celkově hodnoty v DS klesaly mnohem strměji, než jak tomu bylo v případě ADSL2. Zatímco hodnoty v DS se blížily hodnotě nastavené přenosové rychlosti na portu č. 12, tak ve směru upstream (US) se neblížily ani zdaleka. V některých případech tato US přenosová rychlost rostla s přibývajícím vzdáleností. Připojením optické trasy došlo k výraznému omezení přenosové rychlosti pod hranici 11,128 Mbit/s v DS. V opačném směru nedošlo k výrazné změně.

Tabulka 94: Naměřené přenosové rychlosti pro síť s VDSL2+ s optickou trasou a bez optické trasy (-120 dBm/Hz).

VDSL2	Spirent DLS 6900 - -120 dBm/Hz			
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]
0	58,241	0,495	10,532	0,448
300	48,246	0,452	12,642	0,380
600	16,245	0,448	8,805	0,382
900	18,803	1,061	7,416	0,834
1200	11,207	0,654	7,283	0,655
1500	6,889	0,682	6,462	0,680
1800	4,487	0,655	4,465	0,652
2100	2,723	0,623	2,720	0,628

Tabulka 95: Naměřené přenosové rychlosti pro síť s VDSL2 s optickou trasou a bez optické trasy (-110 dBm/Hz).

VDSL2	Spirent DLS 6900 - -110 dBm/Hz			
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]
0	49,761	0,364	7,607	0,195
300	40,005	0,383	8,404	0,473
600	20,643	1,323	6,563	1,556
900	9,363	0,596	5,661	0,596
1200	5,847	0,595	4,485	0,595
1500	3,446	0,566	3,312	0,566
1800	1,924	0,566	1,968	0,565
2100	0,307	0,504	0,305	0,504

Tabulka 96: Naměřené přenosové rychlosti pro síť s VDSL2 s optickou trasou a bez optické trasy (-100 dBm/Hz).

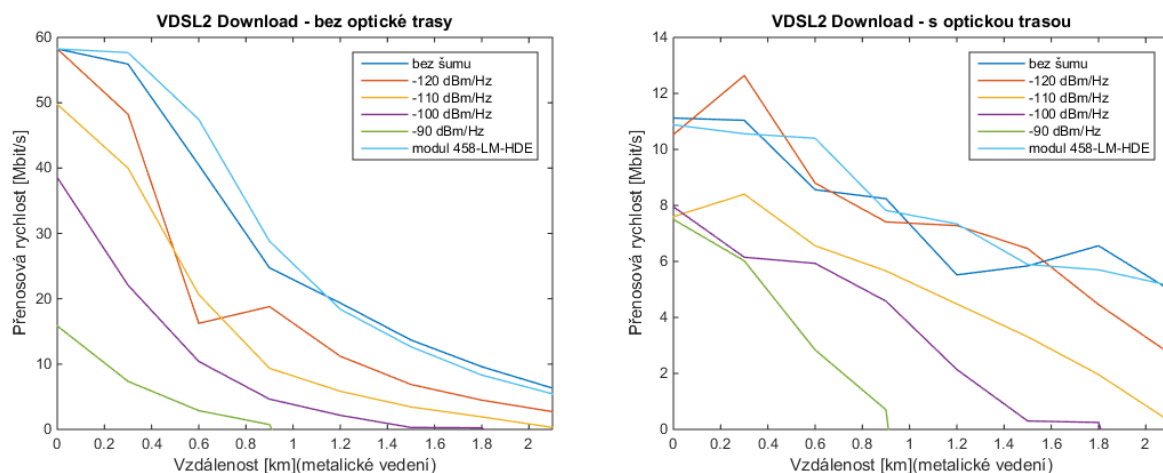
VDSL2	Spirent DLS 6900 - 100 dBm/Hz			
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]
0	38,561	0,802	7,953	0,314
300	22,086	0,353	6,154	0,316
600	10,402	0,596	5,932	0,533
900	4,642	0,474	4,582	0,474
1200	2,165	0,418	2,143	0,417
1500	0,304	0,386	0,301	0,386
1800	0,250	0,326	0,251	0,328
2100	-	-	-	-

Tabulka 97: Naměřené přenosové rychlosti pro síť s VDSL2 s optickou trasou a bez optické trasy (-90 dBm/Hz).

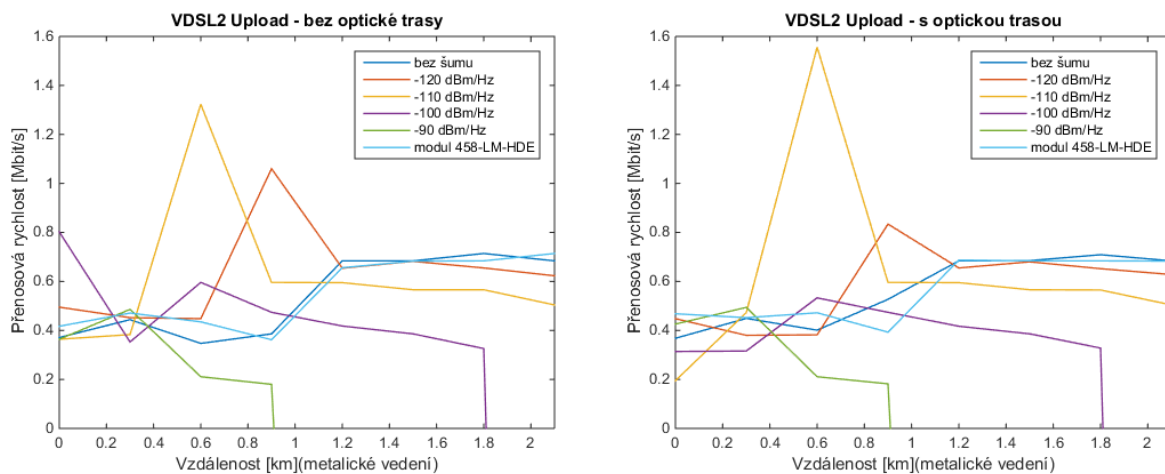
VDSL2	Spirent DLS 6900 - -90 dBm/Hz			
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]
0	15,841	0,364	7,502	0,426
300	7,367	0,486	6,023	0,494
600	2,884	0,211	2,841	0,211
900	0,741	0,183	0,713	0,182
1200	-	-	-	-
1500	-	-	-	-
1800	-	-	-	-
2100	-	-	-	-

Tabulka 98: Naměřené přenosové rychlosti pro síť s VDSL2 s optickou trasou a bez optické trasy (modul 458-LM-HDE).

VDSL2	Telebyte 458-3SL - modul 458-LM-HDE			
Optická trasa	bez optické trasy		s optickou trasou	
Metalická trasa [m]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]	DS [Mbit/s]	US [Mbit/s]
0	58,243	0,417	10,882	0,468
300	57,683	0,471	10,561	0,452
600	47,441	0,435	10,407	0,472
900	28,807	0,362	7,823	0,393
1200	18,409	0,656	7,341	0,687
1500	12,643	0,683	5,892	0,684
1800	8,320	0,684	5,709	0,684
2100	5,447	0,714	5,144	0,683



Obrázek 183: DATA - VDSL2 - přenosová rychlost stahování - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).



Obrázek 184: DATA - VDSL2 - přenosová rychlost nahrávání - bez optické trasy (vlevo) a s přidanou optickou trasou (vpravo).

12 Závěr

Cílem diplomové práce je vybudování heterostrukturní sítě skládající se jak z optické části, tak i metalické. Následně na této síti zkoumat výkonnost na základě změny optické trasy, metalické trasy a přidaného šumu.

První část práce byla věnována teoretickým poznatkům související s diplomovou prací. Nejprve jsou obecně rozebrány optické přístupové sítě. V této části najdeme i řešení problematiky hybridních sítí, jejichž využívání je v současnosti velmi oblíbené na základě poměru cena/výkon. Tato kapitola navíc obsahuje i popis WDM systému, který tvoří jednu část optického elementu v hybridní síti. Další část je tvořena pasivní optickou sítí PON. Princip této technologie je zpracován v kapitole s názvem TDM Passive Optical Network. V této části nalezneme starší i novější varianty pasivních optických sítí pracujících s časovým dělením TDM. Velká část je zde věnována variantě EPON, která využívá Ethernet na druhé vrstvě RM OSI. Tato technologie byla využita jako základní prvek hybridní sítě. Navazující kapitola Síť nové generace - NGN/NGA se zabývá problematikou a budováním nových sítí s vysokou přenosovou kapacitou. Zde je část věnována sítím PON nové generace a technologiím, které by se mohly uplatnit při vývoji budoucí generace PON. Další kapitola popisuje technologie xDSL a její nejznámější varianty včetně ADSL2+ a VDSL2. Obě zmiňované technologie společně s EPON a WDM tvořily hybridní síť. Poslední kapitolou teoretické části jsou Triple play služby, kde byly probrány všechny 3 služby (IPTV, VoIP a datová služba).

Po teoretické části práce pokračuje praktickou částí, ve které je nejdříve popsáno budování sítě. Tato část tvoří použité komponenty a přístroje. V dalších dvou kapitolách jsou prezentovány naměřené výsledky u dílčích technologiích. V první z nich se nacházejí změřené optické parametry systému EPON a WDM. Také se zde vyskytují výsledky z měření útlumu, CD a PMD optických tras. Další kapitola je věnována měření na DSL technologii. Především časově nejnáročnější zde bylo měření přenosových profilů u ADSL2+ a VDSL v kombinaci s metalickou trasou a šumem. Vliv na časovou náročnost měl i VDSL2 modem, který pro připojení k DSLAMu potřeboval při větších vzdálenostech metalického vedení větší množství času. Někdy docházelo i k tomu, že modem se připojil až na podruhé. Pro metalickou délku byly použity dva simulátory vedení a to Spirent DLS 6900 a Telebyte 458-3SL s modulem 458-HDE-LM. Simulátor DLS 6900 navíc umožňoval do trasy přidávat AWGN šum.

V následující kapitole byla testována integrita pomocí testu RFC2544, RFC6349 a ITU-T Y.1564 (Ethersam). Zde byl pro měření na hybridní síti zvolen jeden přenosový profil u technologie ADSL2+ a VDSL2. Opět se zde jednalo o velmi časově náročné měření. Z naměřených hodnot byly vytvořeny patřičné grafy. Výsledky pro každý test byly poněkud odlišné, jelikož všechny tři testy neměřily na stejných vrstvách RM OSI. Velký rozdíl byl detekován při připojení optické trasy. Tam kde testy RFC2544 a RFC6349 naměřily nízké hodnoty propustnosti, tak test Ethersam nedetekoval výrazný pokles tohotu parametru.

Poslední kapitola praktické části byla věnována testováním Triple play službám. První tes-

tovanou službou byla IPTV. Pro streamování videa byly využity vzorky videa s kodekem H.265 a MPEG-2. Vytvořený video stream byl poté analyzován pomocí přístroje EXFO AXS 200/625. Přístroj zaznamenával parametry IP bit rate, IP ztrátovost a IP arrival jitter. Na základě hodnot ztrátovosti bylo možné určit, zda video je sledovatelné. Při nejmenší hodnotě ztrátovosti 0,29 %, která byla naměřena, již nebylo možné streamované video pokládat za sledovatelné. Velmi negativní vliv na kvalitu byl zaznamenán při připojení optické trasy, kdy video nebylo možné sledovat ani při 0 m metalické trasy. Důvodem byla 15 km trasa v systému EPON, která způsobovala současně se splitterem úzké hrdlo celé hybridní sítě. Testování služby VoIP probíhalo pomocí programu IxChariot, který simuloval mezi dvěma počítači hovor a zároveň u tohoto hovoru monitoroval hodnoty MOS a R-faktoru. Při testovaných kombinacích bylo dosaženo vždy úspěchu, kdy byly získány typické hodnoty MOS a R-faktoru u testovaných kodeků. Změna kvality se neprojevovala ani po připojení optické trasy, která ovlivňovala IPTV přenos. Poslední testovanou službou se stala datová služba. V této části byly měřeny přenosové rychlosti stahování a nahrávání za pomoci aplikace BWMeter. Pro tyto účely byl vytvořen webový server, který obsahoval sekci pro stahování a nahrávání dat.

Z naměřených výsledků bylo zjištěno, že přidaná trasa do EPON a WDM systému měla obrovský vliv na přenosové parametry ve směru sestupném. Při testování bylo zjištěno, že příčinou je 15 km trasa mezi OLT jednotkou a splitterem 1 : 32. Při zapojení 10 km trasy byl problém odstraněn. Při následném zapojení 20 km trasy byla ONU jednotka schopná se k OLT připojit, ale přenosové parametry byly ještě více ovlivněny než u 15 km trasy. V takovém případě se TCP propustnost pohybovala na hranici 1 Mbit/s v sestupném směru. Naopak u systému CWDM bylo zjištěno, že při zapojení 50 km trasy komunikace stále probíhala mezi dvěma SFP (1490 nm, 1470 nm) moduly. Kromě 15 km optické trasy výrazně na přenosové parametry působila metalická vzdálenost se šumem. V případě technologie VDSL2+ byl modem schopen se připojit jen do vzdálenosti 900 m při nastavení maximálního šumu simulátorem (- 90 dB/Hz), zatímco u nastavení bez šumu maximální vzdálenost dosáhla na hodnotu 3200 m. ADSL2+ technologie byla dostupná i pro větší vzdálenosti metalického vedení, ale s menšími přenosovými rychlostmi. U nastavení bez šumu bylo možné překlenout metalickou vzdálenost až do 4500 m a se šumem - 90 dBm/Hz jen 2400 m.

Všechny body diplomové práce se podařily naplnit. Během práce nastalo mnoho problému, ale vždy byly úspěšně vyřešeny. Prezentované výsledky v této práci mohou být využity pro další výkonnostní testování na hybridní sítí s různými kombinacemi optických tras v systému EPON a WDM. Navíc u EPON systému lze zvolit různé rozbočovací poměry splitteru a zkoumat tak vliv na výkonnost hybridní sítě.

Literatura

- [1] *Acces server CVUT* [online]. [cit. 2. 12. 2017]. Dostupné na WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006050401>>
- [2] *CVUT*. [online]. [cit. 2. 12. 2017]. Dostupné na WWW: <http://improvet.cvut.cz/project/download/C1CZ/Site_nove_generace.pdf>
- [3] ING. Jiří Vondrážka, Ph.D. *Přenosové systémy v přístupové síti*. Nakladatelství ČVUT, Praha, 2006. ISBN 80-01-03386-4.
- [4] *CVUT* [online]. [cit. 8. 3. 2017]. Dostupné na WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006051702>>
- [5] Ing. Lukáš Bubník, Ing. Jiří Klajbl, Ing. Petr Mazuch *Optoelektrotechnika*. Nakladatelství Code Creator, s.r.o., 2015. ISBN 978-80-88058-20-5
- [6] Leonid G. KAZOVSKY *Broadband Optical Access Networks*. Canada: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-18235-2
- [7] *Acces server CVUT* [online]. [cit. 9. 3 2017]. Dostupné na WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050003>>
- [8] *Insight into EPON & GPON* [online]. [cit. 9. 3 2017]. Dostupné na WWW: <<https://slideplayer.com/slide/5887176/>>
- [9] *Acces server CVUT* [online]. [cit. 9. 3 2017]. Dostupné na WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050002>>
- [10] Přemysl Mer, Marek Dvorský *Přístupové systémy v telekomunikacích pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2014. ISBN 976-80-248-3539-6
- [11] *XtendLan* [online]. [cit. 1. 5. 2018]. Dostupné na WWW: <<https://www.xtendlan.com/>>
- [12] *Acces server CVUT* [online]. [cit. 10. 3 2018]. Dostupné na WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2011030001>>
- [13] *Allied Telesis* [online]. [cit. 9. 3 2018]. Dostupné na WWW: <<https://www.alliedtelesis.com/products/multiservice-access/on1000>>
- [14] *Zyxel* [online]. [cit. 29. 10 2018]. Dostupné na WWW: <<https://www.zyxel.com/cz/cs/>>
- [15] *EXFO* [online]. [cit. 29. 10 2018]. Dostupné na WWW: <<https://www.exfo.com/en/>>
- [16] *IETF* [online]. [cit. 29. 10 2018]. Dostupné na WWW: <<https://www.ietf.org/rfc/rfc2544.txt>>

- [17] *IETF Tools* [online]. [cit. 11. 11 2018]. Dostupné na WWW: <<https://tools.ietf.org/html/rfc6349>>
- [18] *Ethersam: The new standard in Ethernet service testing* [online]. [cit. 14. 11 2018]. Dostupné na WWW: <<https://web.archive.org/web/20120324151807/http://documents.exfo.com/appnotes/anote230-ang.pdf>>
- [19] *Zyxel* [online]. [cit. 18. 11 2018]. Dostupné na WWW: <<https://www.zyxel.com/cz/cs/>>
- [20] ING. Ivan Pravda, Ph.D. *Vysokorychlostní přípojky VDSL a G.fast*. Dostupné na WWW: <<https://publi.cz/books/233/02.html>>
- [21] *ITU-T G.989.3: 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2)* [online]. [cit. 11. 1 2019]. Dostupné na WWW: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.3-201510-I/en>>
- [22] *Next-Generation PON Evolution* [online]. [cit. 11. 1 2019]. Dostupné na WWW: <https://www.huawei.com/ilink/en/download/HW_077443>
- [23] *Recent Progress on Standardization of Next Generation 25, 50 and 100G EPON* [online]. [cit. 23. 12 2018]. Dostupné na WWW: <https://www.researchgate.net/profile/Vincent_Houtsma/publication/311550457_Recent_Progress_on_Standardization_of_Next_Generation_25_50_and_100G_EPON/links/5bba66154585159e8d8bd937/Recent-Progress-on-Standardization-of-Next-Generation-25-50-and-100G-EPON.pdf?origin=publication_detail>
- [24] Tarsono, D.; Ahmad, A.; Khairi, K.; Sharif, K.A.; Othman, M. H.; Ngah, N. A.; Manaf, Z.A. *Optical and Network Performance Analysis of XGS-PON System over Active Co-Existence PON Systems* [online]. [cit. 11. 1 2019]. Dostupné na WWW: <https://www.researchgate.net/publication/319012114_Optical_and_Network_Performance_Analysis_of_XGS-PON_System_over_Active-Co-Existence_PON_Systems/fulltext/598b079f45851519f10fa6e6/319012114_Optical_and_Network_Performance_Analysis_of_XGS-PON_System_over_Active-Co-Existence_PON_Systems.pdf?origin=publication_detail>
- [25] *FSAN Highlights and NG-PON2 Standards Update* [online]. [cit. 14. 1. 2019]. Dostupné na WWW: <http://www.ieee1904.org/events/2015_02_joint_session/js_1502_fsan.pdf>
- [26] *An Analysis of 100G PON Application Prospects* [online]. [cit. 14. 1. 2019]. Dostupné na WWW: <https://www.zte.com.cn/global/about/magazine/zte-technologies/2017/5/en_734/465612>
- [27] *Standardization Trends for Future High-speed Passive Optical Networks* [online]. [cit. 15. 1 2019]. Dostupné na WWW: <<https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201710gls.html>>

- [28] *NG-PON2 Technology and Standards* [online]. [cit. 15. 1. 2019]. Dostupné na WWW: https://www.researchgate.net/profile/Derek_Nesset/publication/272640999_NG-PON2_technology_and_standards/links/579b6ed908ae6a2882f1a545/NG-PON2-technology-and-standards.pdf?origin=publication_detail
- [29] *Pasivní optické sítě WDM-PON* [online]. [cit. 16. 1. 2019]. Dostupné na WWW: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050004>
- [30] Škorpil, Vladislav, Vychodil, Petr a Kapoun Vladimír *Metody přenosu a spojování pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, 2014. ISBN 978-80-214-5124-7.
- [31] *Princip WDM* [online]. [cit. 16. 1. 2019]. Dostupné na WWW: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=princip-wdm&cisloclanku=2004072805>
- [32] *Počítačové sítě* [online]. [cit. 16. 1. 2019]. Dostupné na WWW: http://homen.vsb.cz/~neu10/studium/Po%C4%8D%C3%ADta%C4%8Dov%C3%A9%20s%C3%A1te/INOHGF_EL_PocSite_Kodym.pdf
- [33] *Vysokorychlostní sítě 2004* [online]. [cit. 16. 1. 2019]. Dostupné na WWW: http://vrs.pasnet.cz/vrs2004/Sbornik_vrs2004.pdf
- [34] Pavel, Lafata. *Modulační techniky v moderních bezdrátových sítích* [online]. [cit. 16. 1. 2019]. Dostupné na WWW: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010020004>
- [35] Barrami, Fatima. *Low-complexity direct-detection optical OFDM systems for high data rate communications* [online]. [cit. 19. 1. 2019]. Dostupné na WWW: <https://www.theses.fr/2015GREAT057.pdf>
- [36] ANSARI, Nirwan a Jingjing ZHANG. *Media access control and resource allocation: for next generation passive optical networks*. Heidelberg: Springer, c2013. SpringerBriefs in applied sciences and technology. ISBN 978-1-4614-3939-4
- [37] *Introduction to Passive Optical Networks* [online]. [cit. 18. 1. 2019]. Dostupné na WWW: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779577739671/sierra_gpon_tutorial.pdf
- [38] HENS, Francisco J. a Josee Manuel CABALLERO. *Triple play: building the converged network for IP, VoIP and IPTV*. Hoboken, NJ: Wiley, c2008. ISBN 978-0-470-75367-5
- [39] COMSA, Ioan Sorin a ARSINTE, Radu. *Evaluating QoS Parameters for IPTV Distribution in Heterogeneous Networks* [online]. [cit. 1. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1502/1502.06078.pdf>

- [40] *DOPORUČENÍ KOMISE ze dne 20/09/2010 o regulovaném přístupu k přístupovým sítím nové generace (NGA)* [online]. [cit. 26.2. 2019]. Dostupné na WWW: <<https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/42488/47482/566678/priloha002.pdf>>
- [41] *NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) č. 651/2014* [online]. [cit. 27. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0651&from=CS>>
- [42] *Národní plán rozvoje sítí nové generace* [online]. [cit. 26.2. 2019]. Dostupné na WWW: <<https://www.mpo.cz/assets/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/2016/11/NPRSNG-27-9-2016.pdf>>
- [43] *Vysvětlující materiál k souhrnu otázek týkajících se Programu: Definice přístupových sítí nové generace (NGA)* [online]. [cit. 26.2. 2019]. Dostupné na WWW: <https://www.ctu.cz/cs/download/tiskove-zpravy/rok_2013/tz08_14022013_program-podpory-projektu-vysvetleni.pdf>
- [44] *Metodika pro měření a vyhodnocení datových parametrů pevných sítí elektronických komunikací* [online]. [cit. 28.2. 2019]. Dostupné na WWW: <<https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/stranky/937/soubory/metodikapromereniavyhodnocenidatovychparametrusiti.pdf>>
- [45] BEZPALEC, Pavel *Kvalita služeb datových sítí z hlediska VoIP* [online]. [cit. 29. 1. 2019]. Dostupné na WWW: <https://www.researchgate.net/publication/251815045_Kvalita_sluzeb_datovych_siti_z_hlediska_VoIP>
- [46] KREJČÍ, J a ZEMAN, T. *Úvod do IPTV* [online]. [cit. 29. 1. 2019]. Dostupné na WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008100002>>
- [47] *IPTV - An Overview* [online]. [cit. 3. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <<http://www.guidelightsolutions.com/blog/iptv-overview>>
- [48] *Triple-play Services Quality of Experience (QoE) Requirements* [online]. [cit. 3. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <<https://www.broadband-forum.org/technical/download/TR-126.pdf>>
- [49] *IP - Internet Protocol* [online]. [cit. 3. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <<https://www.earchiv.cz/anovinky/ai1843.php3>>
- [50] *Protokol UDP* [online]. [cit. 3. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <<http://www.earchiv.cz/a93/a303c110.php3>>
- [51] *Protokol UDP* [online]. [cit. 3. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <<https://www.earchiv.cz/a93/a305c110.php3>>

- [52] *MPEG-2 Transmission* [online]. [cit. 3. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <<https://erg.abdn.ac.uk/future-net/digital-video/mpeg2-trans.html>>
- [53] *Co všechno nabízí IPTV* [online]. [cit. 3. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <<https://www.lupa.cz/specialy/iptv/co-vsechno-nabizi-iptv/>>
- [54] *Měření služeb Triple play v pasivních optických sítích* [online]. [cit. 8. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/file.php?id=200001140-6c0506cfef>>
- [55] *Není VOIP jako IP telefonie* [online]. [cit. 8. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <<https://www.earchiv.cz/b07/b1000001.php3>>
- [56] Pravda, I. *Internetová telefonie (VoIP) a protokol SIP* [online]. [cit. 8. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <<https://docplayer.cz/storage/24/3649738/1550774419/W2uJZ72cUqMwMackX2oeqQ/3649738.pdf>>
- [57] *Pohled dovnitř (VOIP)* [online]. [cit. 8. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <<http://www.earchiv.cz/b06/b0401004.php3>>
- [58] *AXS-200/625* [online]. [cit. 9. 5. 2019]. Dostupné na WWW: <https://www.opternus.de/uploads/media/AXS625_db10810e.pdf>
- [59] VOZŇÁK, Miroslav. *Technologie a protokoly multimediálních komunikací pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3326-2.
- [60] *Improving QoS of VoIP over Wlan (IQ-VW)* [online]. [cit. 8. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <https://www.researchgate.net/publication/242071911_Improving_QoS_of_VoIP_over_WLAN_IQ-VW>
- [61] *Posuzování kvalit hlasu* [online]. [cit. 18. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <<http://www.ip-telefon.cz/data/download/40.pdf>>
- [62] VOZŇÁK, Miroslav. *Komunikační systémy pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3325-5.
- [63] Šilhavý, Pavel. *Telekomunikační a informační systémy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014. 978-80-214-5027-1.
- [64] *Základní vlastnosti protokolu HTTP* [online]. [cit. 22. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <<http://www.cs.vsb.cz/grygarek/kotasek/http02.htm>>
- [65] *FTP protokol* [online]. [cit. 22. 2. 2019]. Dostupné na WWW: <<http://www.infomise.8u.cz/fptprotokol.pdf>>

- [66] *Počítačové sítě, verze 3.6* [online]. [cit. 22. 3. 2019]. Dostupné na WWW: <<https://www.earchiv.cz/1224/gifs/S3620.pdf>> <https://www.earchiv.cz/1224/gifs/S3620.pdf>
- [67] *Techno-economic Analysis of NGNs Implementation in Rural Areas Based on the Geographic and Socio-demographic Characteristics of Serbia* [online]. [cit. 22. 3. 2019]. Dostupné na WWW: <<https://www.earchiv.cz/1224/gifs/S3620.pdf>https://www.researchgate.net/publication/320819983_Techno-economic_analysis_of_NGNs_implementation_in_rural_areas_based_on_the_geographic_and_socio-demographic_characteristics_of_Serbia/fulltext/59fc00150f7e9b9968bb71f2/320819983_Techno-economic_analysis_of_NGNs_implementation_in_rural_areas_based_on_the_geographic_and_socio-demographic_characteristics_of_Serbia.pdf?origin=publication_detail>
- [68] *Jak funguje kabelová televize II.: Kabely, sítě a televizní služby* [online]. [cit. 23. 3. 2019]. Dostupné na WWW: <<https://www.lupa.cz/clanky/jak-funguje-kabelova-televize-ii-kabely-site/>>

A Obsah DVD

Součástí DP je i DVD. Adresářová struktura DVD je následující:

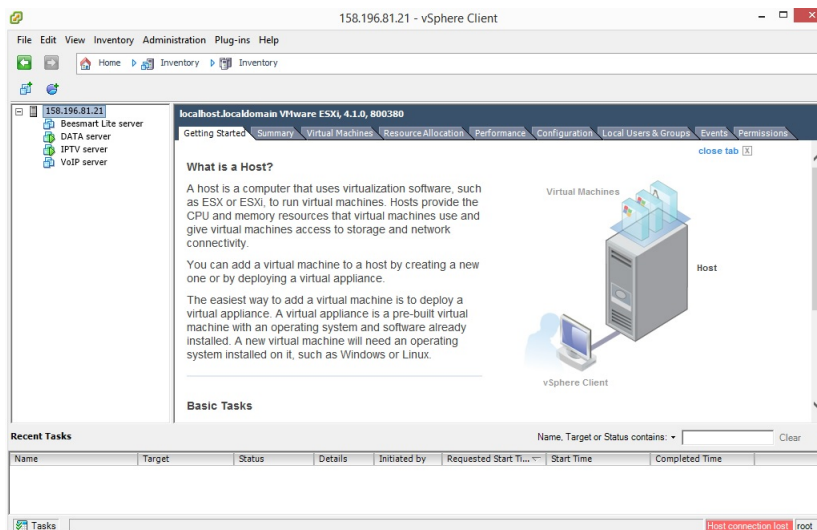
- 01 Elektronická verze DP
- 02 Výsledky měření CD
- 03 Výsledky měření ze spektrální analýzy WDM
- 04 Výsledky měření ITU-T Y.1564 Ethersam
- 05 Výsledky měření RFC2544
- 06 Výsledky měření RFC6349
- 07 Výsledky měření PMD
- 08 Výsledky měření OTDR
- 09 Výsledky měření služby data
- 10 Výsledky měření služby IPTV
- 11 Výsledky měření služby VoIP
- 12 Matlab-grafy

B Nastavení služeb a aplikací

V téhle části přílohy jsou zobrazeny screenshoty z nastavení služeb a aplikací. Na obrázku č.185 je zobrazeno přihlášení k serveru ABACUS pomocí programu VMware vSphere Client. V dalším obrázku č.186 je možné si prohlédnout všechny virtuální stroje, které jsou součástí serveru ABACUS.



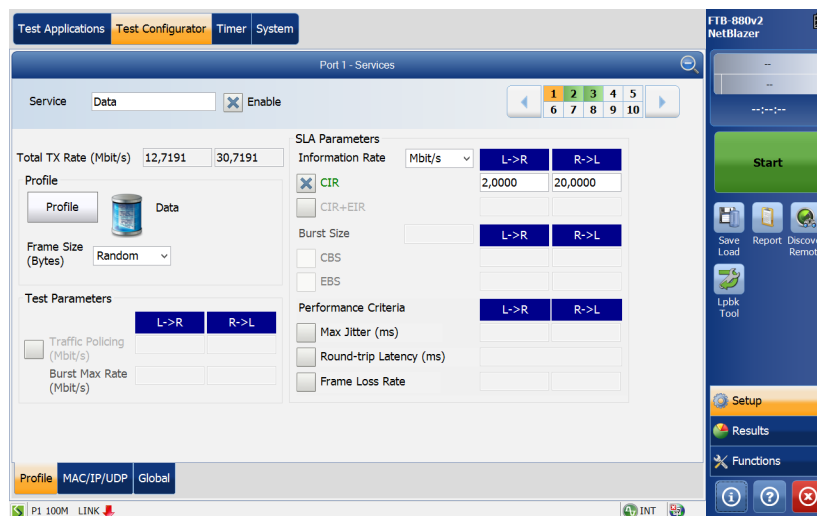
Obrázek 185: Přihlášení k serveru ABACUS prostřednictvím programu VMware vSphere.



Obrázek 186: Virtuální stroje na serveru ABACUS.

B.1 Vstupní parametry pro test ITU-T Y.156 - Ethersam

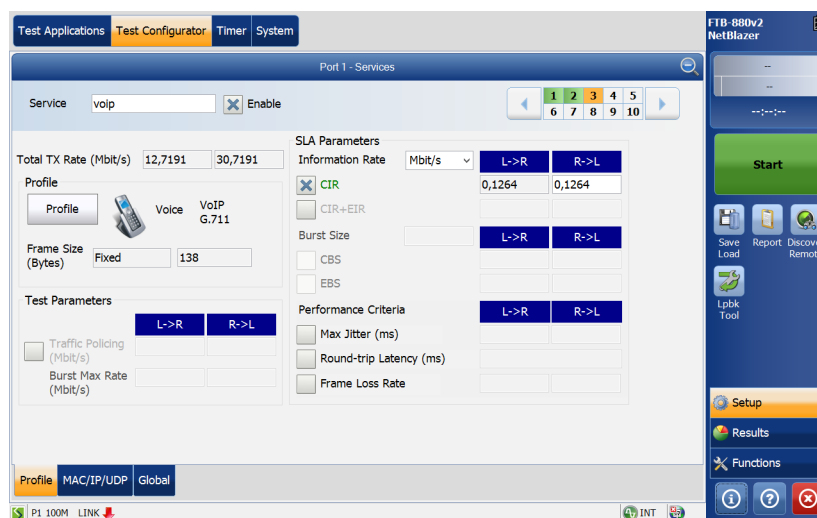
Zde jsou zobrazeny screenshoty z nastavení vstupních parametrů pro test Ethersam.



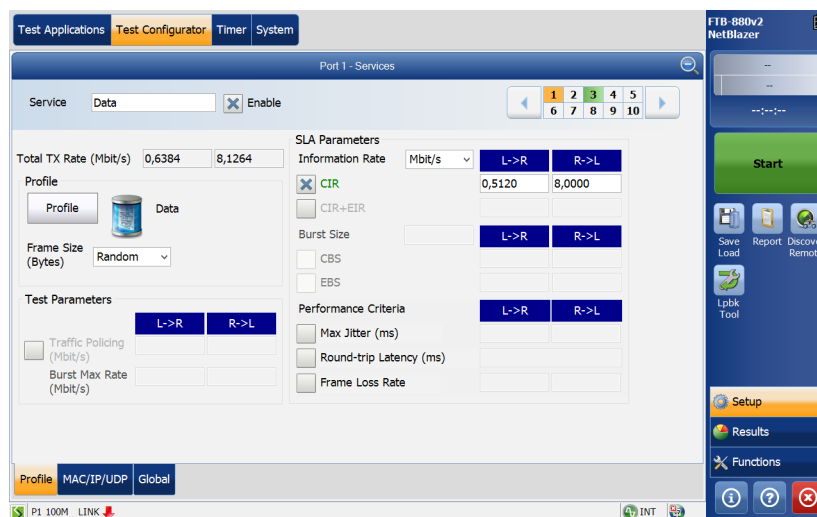
Obrázek 187: Nastavení služby Data při testu Ethersam (VDSL2).



Obrázek 188: Nastavení služby IPTV při testu Ethersam (VDSL2).



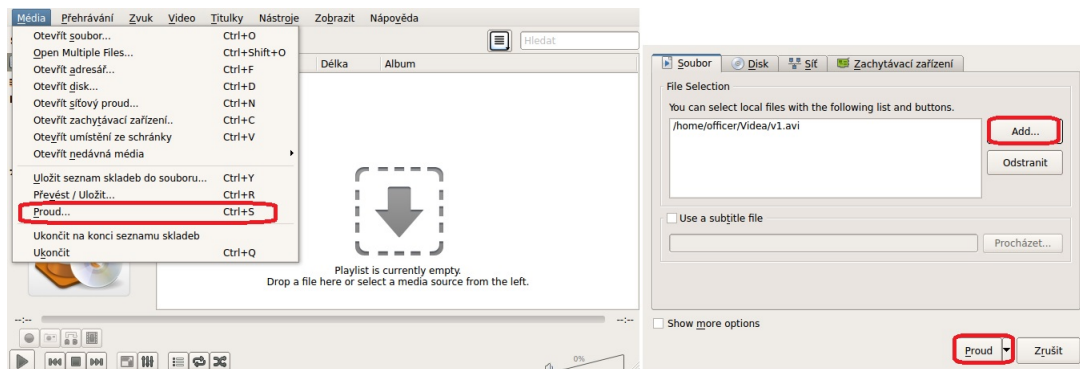
Obrázek 189: Nastavení služby Voip při testu Ethersam (VDSL2)



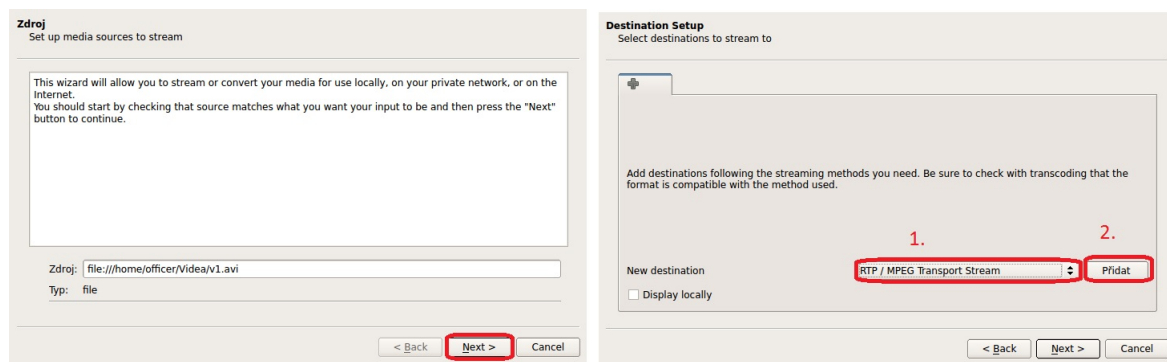
Obrázek 190: Nastavení služby Data při testu Ethersam (ADSL2+).

B.2 Nastavení multicastového vysílání ve VLC

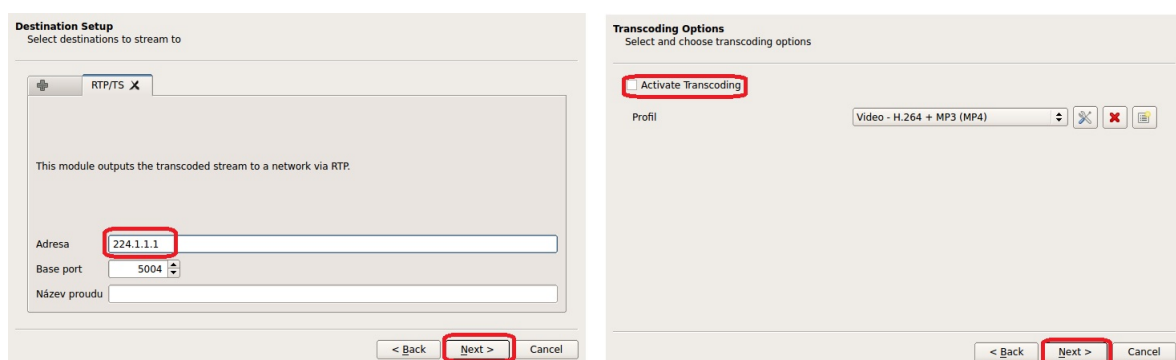
V následujících obrázcích je krok po kroku zobrazeno nastavení multicastového vysílání videa ve VLC.



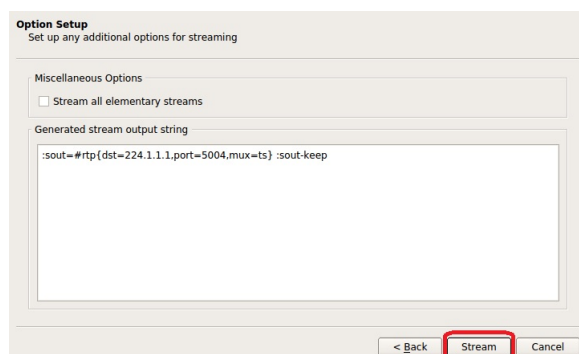
Obrázek 191: Nastavení streamování videa - krok 1 a 2.



Obrázek 192: Nastavení streamování videa - krok 3 a 4.



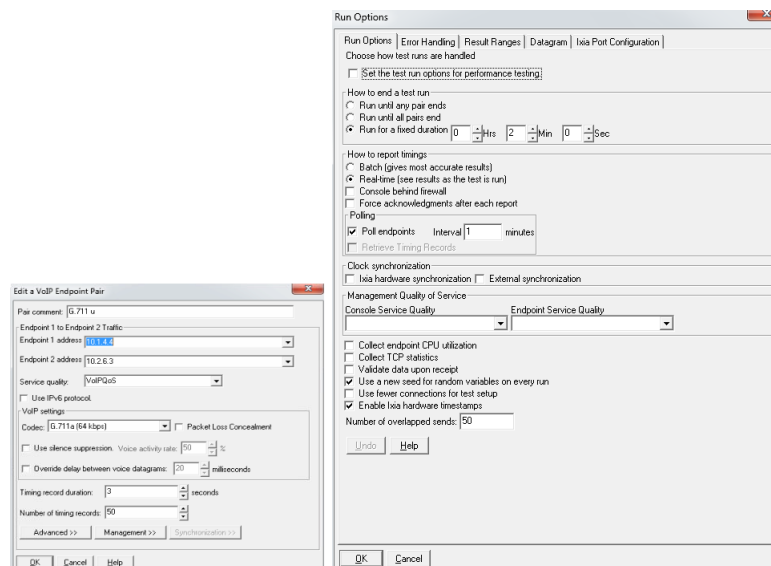
Obrázek 193: Nastavení streamování videa - krok 5 a 6.



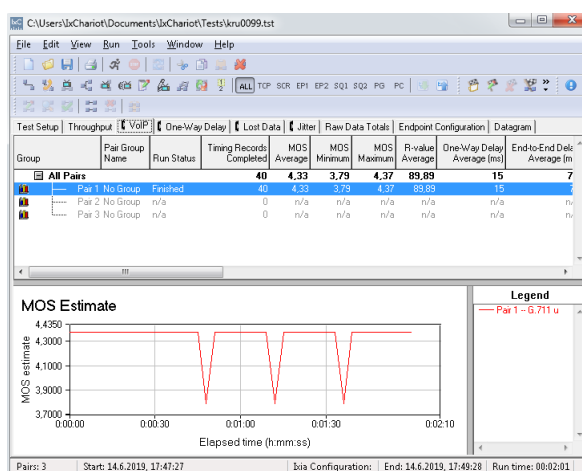
Obrázek 194: Nastavení streamování videa - krok 7.

B.3 Nastavení v programu IxChariot

Zde jsou zobrazeny screenshoty s nastavením programu IxChariot pro měření kvality služby VoIP.



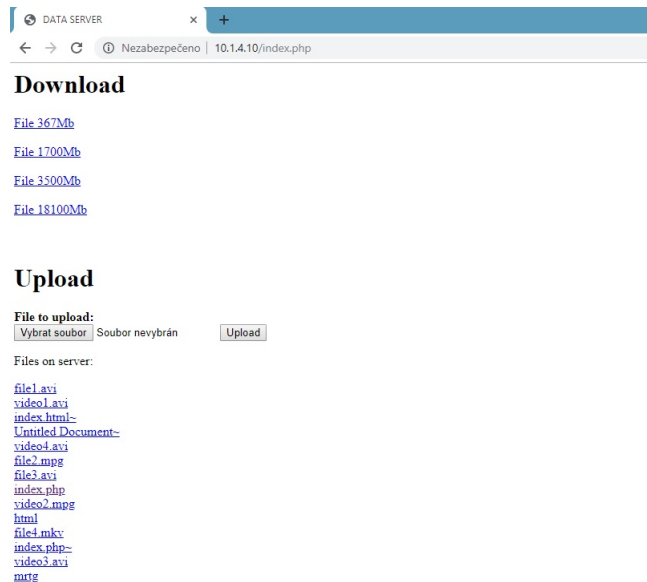
Obrázek 195: Nastavení v programu IxChariot pro službu VoIP.



Obrázek 196: Průběh měření kvality hovoru.

B.4 Web server pro datovou službu

Na obrázku je zobrazena vizuální podoba web serveru pro datovou službu. Pro zobrazení web serveru stačilo zadat do prohlížeče adresu 10.1.4.10.



Obrázek 197: Zobrazení web serveru pomocí prohlížeče.